

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

**Analýza magnetického pole typového
elektromagnetického jha měřením**

**Analysis of Magnetic Field of the Types
Electromagnetic Yoke by Measuring**

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Varmuža**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Analýza magnetického pole typového elektromagnetického jha měřením**
Analysis of Magnetic Field of the Types Electromagnetic Yoke by
Measuring

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický úvod.
- 2) Základní principy elektromagnetického pole a magnetických obvodů.
- 3) Možnosti a principy měření magnetických polí.
- 4) Příprava a realizace virtuálního měřicího pracoviště pro měření a diagnostiku magnetických polí typových elektromagnetických soustav.
- 5) Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Draxler, K.: Magnetické prvky a měření, CVUT, Praha, 1999
Trnka, Z., Dufek, M., Hrabák, J.: Magnetická měření, SNTL, Praha, 1966
Brož, J.: Moderní problémy feromagnetismu, Academia, Praha, 1962
Dědek, L.: Teorie elektromagnetického pole, VUT, Brno, 1990
Haňka, L.: Teorie elektromagnetického pole, SNTL, Praha, 1975
Gardner, W.J., Microsensors - Principles and Applications, Wiley, 1994
firemní katalogy a prospekty

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Marek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

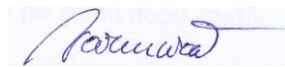

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.



Bc. Petr Varmuža

Datum odevzdání diplomové práce: 4. května 2012

Poděkování

Děkuji touto cestou vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Markovi, Ph.D., za jeho cenné rady a pomoc při vypracovávání diplomové práce. Taktéž bych rád poděkoval své manželce, rodičům a nejbližší rodině za podporu a pomoc po celou dobu studia.

Abstrakt

V této diplomové práci jsou obsaženy základní informace o elektromagnetickém poli, jeho měření a zpracování dat.

Diplomová práce ve svém rozsahu obsahuje teoretický rozbor elektromagnetického pole, jeho základní principy a veličiny. Dalšími nezbytnými informacemi jsou možnosti měření magnetických polí a jejich principy. Hlavním praktickým přínosem je realizace virtuálního měřicího pracoviště pro měření a diagnostiku magnetických polí typových elektromagnetických soustav realizované ve virtuální instrumentaci LabVIEWTM.

Klíčová slova

Elektromagnetické pole, intenzita magnetického pole, indukce, indukce v železe, magnetické obvody, Hallovy sondy.

Abstract

In this thesis are contained basic information about the electromagnetic field, its measurement and data processing.

Thesis in its scope includes theoretical analysis of the electromagnetic field, its basic principles and values. Other necessary information is the possibility of measurement of magnetic fields and its principles. The main practical contribution is the implementation of a virtual workplace for measurement and diagnostics of magnetic fields of electromagnetic type systems implemented in virtual instrumentation LabVIEWTM.

Key words

The electromagnetic field, induction, induction in the iron magnetic circuits, Hall probe.

Seznam použitých symbolů a zkratek

μ_0	[H/m]	Permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7}$)
μ_r	[-]	Relativní permeabilita prostředí
ℓ	[C]	Nejmenší elementární kvantum náboje ($1,6029 \cdot 10^{-19}$)
ϕ	[Wb]	Magnetický tok
ϕ_r	[Wb]	Rozptylový tok
γ	[-]	Konduktivita prostředí
ε_0	[F/m]	Permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12}$)
ε_r	[-]	Relativní permitivita
ρ	[C/m ³]	Objemová hustota náboje
ψ	[C]	Elektrický indukční tok
d	[m]	Tloušťka vzorku
d_t	[ms]	Časový interval mezi snímanými vzorky
l	[m]	Délka
m	[kg]	Hmotnost
r	[m]	Poloměr
t_0	[-]	Počáteční čas měření
u_i	[V]	Napětí indukované v závitu cívky
v	[m/s]	Rychlost pohybujícího se náboje
B	[T]	Magnetická indukce
D	[C/m ²]	Elektrická indukce
E	[V/m]	Intenzita elektrického pole
F	[N]	Síla
G_m	[H]	Magnetický vodivost
H	[A/m]	Intenzita magnetického pole
I	[A]	Elektrický proud
J	[A/m ²]	Hustota vodivého proudu
L	[H]	Vlastní indukčnost cívky
N	[-]	Počet závitů cívky
Q	[C]	Náboj
R	[Ω m/T]	Hallova konstanta

R_m	[H ⁻¹]	Magnetický odpor (reluktance)
S	[m ²]	Plocha
U_H	[V]	Hallovo napětí
U_m	[A]	Magnetické napětí
U_{mc}	[A]	Celkové magnetické napětí
U_{mk}	[A]	Úbytek magnetického napětí
FEG		Field emission gun
FFT		Fast Fourierova transformace
LabVIEW		Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
NI		National Instruments
RTG		Rentgenové záření
SEM		Skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop
subVI		Podprogram
TEM		Transmisní elektronový mikroskop
ZnS		Sulfid zinečnatý

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Základní elektromagnetické principy	2
2.1 Elektrický náboj	2
2.2 Elektromagnetické pole	2
2.3 Magnetické vlastnosti látek.....	3
2.4 Základní pojmy elektromagnetického pole.....	4
2.4.1 Intenzita magnetického pole.....	4
2.4.2 Magnetická indukce.....	4
2.4.3 Magnetický tok	4
2.4.4 Magnetické napětí	5
2.4.5 Magnetický odpor a magnetická vodivost	5
2.5 Elektromagnetické obvody a jejich řešení	6
2.5.1 Metody řešení rozptylových polí.....	8
2.5.2 Zákony platící pro elektromagnetické pole	9
2.6 Maxwellovy rovnice	11
3. Elektronové mikroskopy	14
3.1 Transmisní elektronový mikroskop - TEM	14
3.2 Rastrovací elektronový mikroskop - SEM.....	17
4. Možnosti a principy měření magnetických polí.....	19
4.1 Indukční čidla	19
4.1.1 Indukční cívka	19
4.1.2 Rotační a vibrační cívky.....	20
4.1.3 Feromagnetické sondy (fluxgate)	21
4.2 Magnetogalvanická čidla	22
4.2.1 Hallova sonda	22
4.2.2 Magnetodioda.....	23
4.2.3 Magnetotranzistor	23
4.2.4 Magnetorezistor	23

5. Magnetické čočky	25
5.1 Elektronový svazek	25
5.2 Typy používaných magnetických čoček	26
5.3 Vady čoček	27
6. Příprava a realizace virtuálního měřicího pracoviště	29
6.1 Programové prostředí LabVIEW TM	30
6.2 NI – USB 6008	31
6.3 Teslametr F.W. Bell 5180	31
6.4 Virtuální měřicí pracoviště	32
6.5 Měření elektromagnetického jha	39
7. Závěr	47
Seznam použité literatury.....	49
Přílohy diplomové práce.....	51

1. Úvod

Při výběru vhodného tématu závěrečné diplomové práce jsem chtěl realizovat své poznatky a dovednosti s programováním ve vývojovém prostředí LabVIEWTM. Po první konzultaci s vedoucím práce jsem se rozhodl realizovat práci na téma: „Analýza magnetického pole typového elektromagnetického jha měřením“, i když jsem věděl, že téma magnetického pole je poměrně rozsáhlé.

V první části diplomové práce jsem se zaměřil na základní informace o elektromagnetickém poli a jeho vysvětlení. Jsou zde vysvětleny pojmy jako magnetická indukce, intenzita magnetického pole, magnetický tok a další základní veličiny pole. Dále zde najdeme nástin řešení magnetických polí a jsou zde i okrajově zmíněny Maxwellovy rovnice.

Jelikož tato práce byla zaměřena na elektromagnetické cívky a jejich využívání v technické praxi, jsou ve třetí kapitole zmíněny elektronové mikroskopy, jejich dělení, principy fungování a základní struktury jednotlivých elektronových mikroskopů.

Ve čtvrté kapitole najdeme popis používaných měřicích sond a čidel pro měření magnetických polí. Jak indukční tak i magnetogalvanická čidla. Ve výčtu těchto čidel najdeme jejich základní principy měření společně se společnostmi, které je vyrábí.

Elektromagnetické cívky používané v elektronových mikroskopech, nazývané též elektromagnetické čočky, trpí podobnými neduhy jako čočky optické. Mají své specifické vady, které mohou obraz z elektronového mikroskopu různě zkreslit. Proto se v páté kapitole věnuji těmto vadám a jejich vlivu na výsledný obraz z elektronového mikroskopu.

V předposlední kapitole se dostaneme k samotné praktické části diplomové práce. Jsou zde popsány a vysvětleny principy programování v LabVIEWTM. Zadané úkoly a požadavky na virtuální měřicí pracoviště, které bude vhodnou pomůckou pro praktické měření, a jejich přesné vysvětlení společně s ukázkou řešení v samotném programu. Dále zde nalezneme informace o použitých přístrojích při reálném měření. V této kapitole dále najdeme popis a rozbor reálného měření na dvou typech elektromagnetů s výsledky získanými z virtuální měřicí laboratoře a grafy zpracovanými v tabulkovém editoru Microsoft Office Excel.

V poslední kapitole se věnuji celkovému zhodnocení diplomové práce, výsledků měření a možnosti využití realizovaného programu v budoucnosti při podobných měřeních.

2. Základní elektromagnetické principy

Každá látka je vytvořena z elementárních částic jakými jsou kupříkladu protony, neutrony, elektrony. Z nich jsou vybudovány složitější útvary, jako jsou atomy, molekuly a jiné. Tyto částice na sebe vzájemně působí silami, které mají různou podstatu. Nejznámější jsou síly gravitační a elektromagnetické. Elektromagnetické síly se projevují mezi těmi částicemi, které jsou nositeli elektrického náboje. Říkáme, že tyto částice jsou nabité. Příkladem nabité částice je elektron a proton.[1]

2.1 Elektrický náboj

Elektrický náboj je z hlediska elektromagnetických jevů základní vlastností částice. Jako fyzikální veličina má ve fyzice a speciálně v teorii elektromagnetického pole zcela výjimečné postavení. Na základě mnoha experimentů a úvah byly určeny tyto jeho vlastnosti:

- Náboj nemůže existovat samostatně, vždy je vázán na částici
- Existují dva druhy náboje, kladný (proton) a záporný (neutron)
- Náboj nelze neomezeně dělit. Jeho nejmenší elementární kvantum označujeme symbolem e a je $e = 1,6029 \cdot 10^{-19}$ [C]
- Jednotkou elektrického náboje je coulomb[1]

2.2 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole můžeme definovat jako vektorové pole, které se projevuje silovými účinky na náboje v klidu i v pohybu.

Náboj a pole existují zároveň a nemá proto smysl uvažovat, co je příčinou a následkem. Elektrický náboj považujeme za zdroj pole.

Obecné elektromagnetické pole, ať již přírodní, či vytvořené lidskou činností, je nestacionární, to znamená, že je charakterizováno neustálou časovou proměnností. Často je však možné považovat proměnlivost pole za bezvýznamnou nebo „pomalou“. Takové zjednodušení podstatně usnadní pochopení i analýzu pole a umožní postupovat od relativně jednoduchých závislostí ke složitějším. Podle stupně zjednodušení lze pole třídit:

- **Pole statická** – Uvažujeme všechny náboje (zdroje pole) v klidu
- **Pole stacionární** – Jsou vytvářena náboji, které se pohybují tak, že vytvářejí stacionární proudy. V technické praxi tato pole odpovídají polím vázaným na „stejnoseměrný proud“
- **Pole kvazistacionární** – Představuje určité zjednodušení obecného nestacionárního pole, které spočívá v zanedbání tzv. posuvného proudu proti proudům volných elektronů.
- **Pole nestacionární** – Jsou obecná elektromagnetická pole. [1]

2.3 Magnetické vlastnosti látek

Velikost magnetické indukce magnetického pole vodiče s proudem, např. cívky, závisí také na permeabilitě prostředí, v němž se cívka nachází. Například ocel má značnou relativní permeabilitu (řádově 1000). Proto je magnetická indukce pole cívky navinuté na ocelovém jádře mnohem větší než u téže cívky bez jádra.

Většina látek ovšem nemá tak velkou relativní permeabilitu, a u některých je dokonce menší než 1, takže látka vlastně magnetické pole zeslabuje. Hodnota relativní permeability atomů je určena vlastnostmi atomů, z nichž je látka složena. K tomuto poznatku dospěl již Ampere, který tvrdil, že magnetické vlastnosti látek určují elektrické proudy uvnitř těchto látek.

Velmi zjednodušeně je možno si představit, že elektrony v atomech se pohybují po malých uzavřených smyčkách a vytvářejí elementární magnetická pole, která se skládají a vytvářejí výsledné magnetické pole atomu. Podle uspořádání elektronů v atomu může nastat případ, že se magnetická pole uvnitř atomu navzájem zcela ruší. Takové atomy nazýváme **diamagnetické**. Pokud se elementární magnetická pole ruší jen částečně, jsou atomy **paramagnetické**.

Tím vysvětlujeme existenci tří základních skupin magnetických látek:

1. **Diamagnetické látky** se skládají z diamagnetických atomů a mají relativní permeabilitu nepatrně menší než 1. To znamená, že mírně zeslabují magnetické pole. Patří sem inertní plyny, zlato, měď, rtuť aj.
2. **Paramagnetické látky** se skládají z paramagnetických atomů a jejich relativní permeabilita je nepatrně větší než 1. Mírně zesilují magnetické pole. Patří sem např. sodík, draslík, hliník a řada dalších prvků. Magnetické pole v paramagnetické látce nelze zesílit ani vnějším polem o velké magnetické indukci.
3. **Feromagnetické látky** jsou složeny také z paramagnetických atomů, ale v takovém uspořádání, že značně zesilují magnetické pole. Jejich relativní permeabilita má velkou hodnotu (10^2 až 10^5).

Již slabým magnetickým polem lze u feromagnetických látek vyvolat takové uspořádání atomů, že se magnetické pole zesílí. Dochází k magnetování látky a magnetické pole v ní zůstává, i když vnější působení zanikne.

Feromagnetismus látek se projevuje jen tehdy, když je materiál v krystalickém stavu. V kapalném nebo plynném stavu se feromagnetické látky chovají jako látky paramagnetické. Feromagnetismus je tedy vlastností struktury látky, nikoli jednotlivých atomů.

Pro každou feromagnetickou látku existuje určitá teplota, při jejímž překročení látka ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se látkou paramagnetickou. Tato teplota se nazývá **Curieova teplota**.

Mezi feromagnetické látky patří také látky ferimagnetické neboli ferity. Jsou to často sloučeniny oxidu železa s oxidy jiných kovů (Mn, Ba). Mají mnohem větší elektrický odpor než kovové feromagnetické látky a našly široké využití v praxi jako permanentní magnety. [2]

2.4 Základní pojmy elektromagnetického pole

2.4.1 Intenzita magnetického pole

Jedná se o vektorovou veličinu vycházející z I. Maxwellovy rovnice. Ve vzdálenosti r od přímého velmi dlouhého vodiče s proudem I intenzita magnetického pole H

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} [\text{Am}^{-1}; \text{A, m}] \quad (2.4.1)$$

Jednotka intenzity magnetického pole je 1 Am^{-1} . Jedná se vlastně o intenzitu pole ve vzdálenosti $r = 1/(2\pi) \text{ m}$ od vodiče, kterým protéká proud $I = 1 \text{ A}$.

Vztah mezi intenzitou magnetického pole a magnetickou indukcí je dán vztahem:

$$H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0} ; B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H \quad (2.4.2)$$

μ ... poměrná (relativní) permeabilita prostředí,

μ_0 ... magnetická konstanta (permeabilita vakua) $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$. [4]

2.4.2 Magnetická indukce

Magnetickou indukci rozumíme vektorovou veličinu, definovanou jako sílu, působící na vodič, kterým prochází elektrický proud. Jedná se o indukci homogenního pole, ve kterém na vodič s délkou $l = 1 \text{ m}$ působí síla $F = 1 \text{ N}$, jestliže je vodič kolmý na směr indukce B a procházející proud $I = 1 \text{ A}$.

$$F = B \cdot I \cdot l [\text{N}; \text{T, A, m}] \quad (2.4.3)$$

- Značíme ji B
- Jednotka $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

tab. 2.4.1- Příklady velikostí indukci z praxe

<i>Ve feromagnetiku</i>	1,5 T až 2 T
<i>Zemské magnetické pole</i>	40 μT
<i>Na povrchu permanentních magnetů</i>	0,2 T až 0,6 T
<i>Vzduchová mezera lab. elektromagnetů</i>	1 T až 2 T
<i>Supravodivé cívky</i>	10 T až 20 T

[4]

2.4.3 Magnetický tok

Magnetickým tokem se rozumí skalární veličina, která je definována napětím u_i , indukovaným v závitu, při časové změně toku Φ podle vztahu (2.4.4).

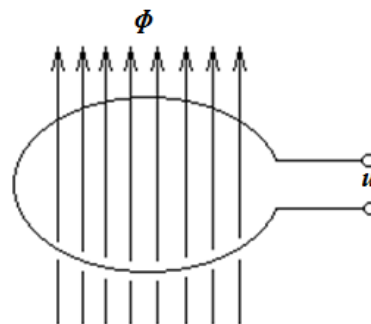
$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} [\text{V}; \text{Wb, s}^{-1}] \quad (2.4.4)$$

Magnetický tok 1 Wb (Weber) odpovídá indukovanému napětí 1 V, které podle **obr. 2.4.1** vznikne v závitě obklopujícím tok při poklesu z 1 Wb na 0 Wb, v čase $t = 1$ s.

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \iint_S B_n \cdot dS [\text{Wb}; \text{T} \cdot \text{m}^2] \quad (2.4.5)$$

B_n je složka \mathbf{B} kolmá k ploše dS . Podle (2.4.5) jednotkový tok procházející v homogenním poli plochou $S = 1 \text{ m}^2$ kolmou ke směru indukce \mathbf{B} , kde $B = 1 \text{ T}$. Jestliže je pole homogenní a vektor \mathbf{B} je kolmý na plochu S , pak

$$\Phi = B \cdot S [\text{Wb}; \text{T} \cdot \text{m}^2] \quad (2.4.6)$$



obr. 2.4.1 - Magnetický tok [4]

Ze vztahu (2.4.4) je možno 1 Wb vyjádřit jako 1 Vs (Voltsekunda). [4]

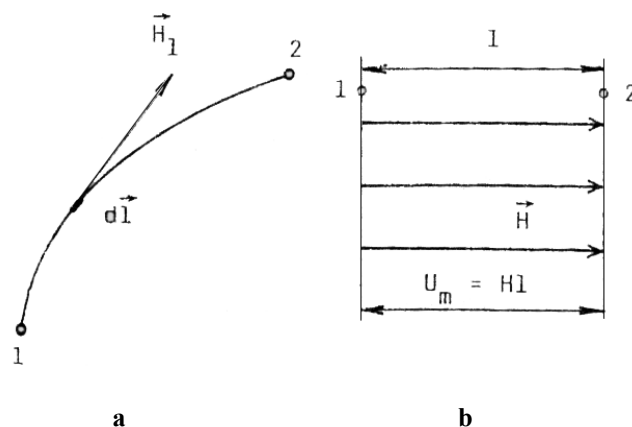
2.4.4 Magnetické napětí

Magnetické napětí je skalární veličina. U_m mezi body 1 a 2 měřené po dráze l na **obr. 2.4.2a** je definováno vztahem:

$$U_m = \int_1^2 \mathbf{H}_l \cdot d\mathbf{l} [\text{A}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}] \quad (2.4.7)$$

V homogenním poli je mezi body 1 a 2, jejichž spojnici je směr vektoru \mathbf{H} **obr. 2.4.2b**, magnetické napětí:

$$U_m = H \cdot l [\text{A}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}] \quad (2.4.8)$$



obr. 2.4.2 - Magnetické napětí [4]

Jednotkou magnetického napětí je A. [4]

2.4.5 Magnetický odpor a magnetická vodivost

Magnetický odpor (reluktance dráhy) magnetického toku se počítá podobně jako elektrický odpor vodiče. Homogenní magnetický vodič s délkou l , průřezem S a relativní permeabilitou μ má magnetický odpor (reluktanci):

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S} [\text{H}^{-1}; \text{m}, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}^2] \quad (2.4.9)$$

Převrátíme-li hodnotu magnetického odporu, dostane magnetickou vodivost (permeanci):

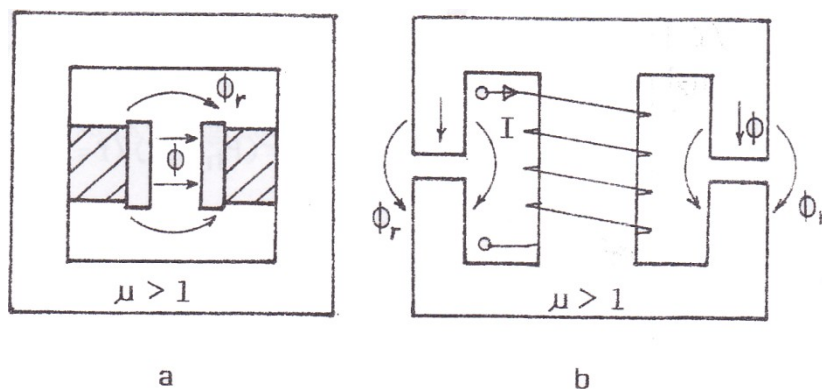
$$G_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot S}{l} [\text{H}; \text{H}^{-1}; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}^2, \text{m}] \quad (2.4.10)$$

Výše popsané vztahy (2.4.9 a 2.4.10) platí pouze pro homogenní magnetické pole. [4]

2.5 Elektromagnetické obvody a jejich řešení

Základem magnetického obvodu je dráha magnetického toku Φ , s plochou průřezu upravenou, tak aby se v ní soustředila většina magnetického toku. Pouze malá část jde mimo tento obvod a nazývá se rozptylový tok Φ_r . Většinová část obvodu je tvořena feromagnetikem s permeabilitou $\mu \gg 1$, což zajišťuje soustředění magnetického toku do požadované dráhy.

Zdrojem magnetického toku v obvodech je permanentní magnet **obr. 2.5.1a** nebo vinutí, jímž prochází proud **obr. 2.5.1b**. [4]



obr. 2.5.1 – Zdroje magnetického toku [4]

Řešení magnetických obvodů

Řešení magnetických obvodů je při porovnání s elektrickými obvody poměrně složité ze dvou příčin:

- A) Magnetické vodiče a nevodiče jsou nedokonalé. Jelikož není možné učinit dokonalý spoj v magnetickém obvodu, vznikají zde rozptylové toky Φ_r .
- B) Nelineární charakteristiky a hystereze feromagnetických materiálů. Permeabilita feromagnetik se v závislosti na indukci mění v širokých mezích a není lineární. Musíme počítat také s tím, že okamžitá hodnota toku není dána pouze okamžitou hodnotou magnetovacího proudu, ale i předchozím magnetickým stavem materiálu.

Z těchto důvodů se používají jednoduché přibližné výpočty, při kterých problémy linearizujeme, a poté se výsledky zpřesňují po přibližném výpočtu. [4]

Základní vztahy pro řešení magnetických obvodů

Při použití analogie s Ohmovým zákonem platí v magnetickém obvodu **obr. 2.5.2a** mezi body 1 a 2, kde nevzniká rozptylový tok

$$U_m = R_m \cdot \Phi = \frac{\Phi}{G_m} \quad (2.5.1)$$

U_m ... magnetické napětí (jeho úbytek) mezi dvěma průřezy magnetického obvodu [A]; odpovídá elektrickému napětí U ,

R_m ... reluktance (magnetický odpor) dráhy toku [H^{-1}]; odpovídá elektrickému odporu R ,

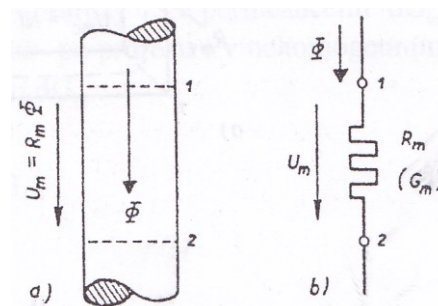
G_m ... permeance (magnetická vodivost) [H]; odpovídá elektrické vodivosti G ,

Φ ... magnetický tok [Wb]; odpovídá elektrickému proudu I .

Podle prvního Kirchhoffova zákona pro elektrické obvody, kdy součet proudů přitékajících do uzlu se v každém okamžiku rovná nule $\sum I = 0$, lze pro magnetické obvody napsat vztah:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0 \quad (2.5.2)$$

Φ_k ... jsou toky jednotlivých větví magnetického obvodu, které se stýkají v jednom uzlu



obr. 2.5.2 – Magnetický obvod [4]

Dále podle druhého Kirchhoffova zákona, kdy součet napětí na všech prvcích podél uzavřené smyčky je v každém okamžiku roven nule $\sum U = 0$, lze pro magnetické obvody napsat vztah:

$$\sum_{k=1}^n U_{mk} = U_{mc} = \sum I = N \cdot I \quad (2.5.3)$$

U_{mk} ... úbytek magnetického napětí [A] na k-tém úseku uzavřené dráhy v magnetickém obvodu,

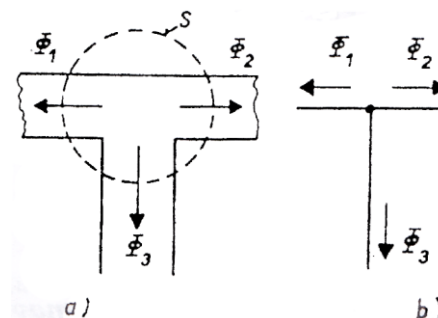
U_{mc} ... celkové magnetické napětí pro danou uzavřenou dráhu,

N ... počet závitů cívky.

Dosažením rovnice (2.5.1) do rovnice (2.5.3) dostaneme Hopkinsonův zákon pro smyčku magnetického obvodu magnetovaného cívkou s N závitů a s proudem I :

$$\sum_{k=1}^n R_{mk} \cdot \Phi_k = N \cdot I \quad (2.5.4)$$

R_{mk} a Φ_k ... je reluktance a tok k-tého úseku [4]



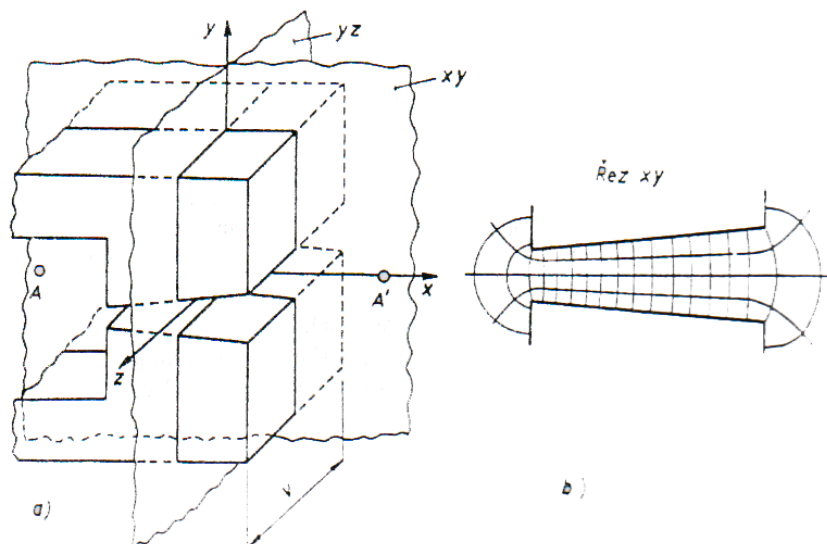
obr. 2.5.3 – Kirchhoffovy zákony pro mag. obvody [4]

2.5.1 Metody řešení rozptylových polí

Permeance drah rozptylových toků má u magnetických obvodů podstatný vliv na výsledek řešení, proto je tedy nemůžeme při samotném výpočtu zanedbat. Abychom mohli provést přibližný a rychlý výpočet, můžeme využít čtverečkovou metodu. [4]

Řešení pole čtverečkovou metodou

Jako příklad si uveďme řešení permeance klínové vzduchové mezery, která je na **obr. 2.5.4a**



obr. 2.5.4 - Klínová vzduchová mezera [4]

Předpokladem pro řešení je shodnost rovinných polí vzniklých řezem XY. Dalším předpokladem je, že povrch feromagnetických materiálů tvoří ekvipotenciální plochy. Poté se v řezu XY (**obr. 2.5.4b**) postupně dokresluje ekvipotenciály a indukční čáry tak, aby vznikla síť obrazců, která je podobná čtverečům. Podle tohoto nákresu (**obr. 2.5.4b**) ekvipotenciálních a indukčních čar rovinného pole, nakreslených touto metodou, lze určit přibližnou permeanci vzduchové mezery podle vztahu:

$$G_m = \mu_0 \cdot \frac{m}{n} \cdot v \quad (2.5.5)$$

G_m ... permeance kreslené oblasti pole [H],

m ... počet paralelních nakreslených trubíc,

n ... počet sériově řazených čtverečků v indukční trubici,

v ... hloubka obvodu ve směru kolmém k nákresně.

Vztah (2.5.5) nerespektuje permeanci rozptylových toků vystupující z přední a zadní stěny pólů. Jestliže permeance těchto drah nelze zanedbat, musíme je určit jiným způsobem.

Pro oblast řešenou na **obr. 2.5.4b** je $m = 17$, $n = 4$, $v = 100 \text{ mm}$

$$G_m = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{17}{4} \cdot 0,1 = 5,3 \cdot 10^{-7} \text{ [H]} \quad (2.5.6)$$

Vektory \mathbf{H} a \mathbf{B} jsou kolmé k ekvipotenciálním čarám a jejich přibližnou velikost ve středu některého čtverce určíme podle vztahu:

$$H = \frac{\Delta V_m}{l_c} = \frac{U_m}{n \cdot l_c} \quad (2.5.7)$$

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (2.5.8)$$

ΔV_m ... rozdíl magnetických potenciálů mezi ekvipotenciálami ohraničující čtvereček [A],

U_m ... magnetické napětí mezi póly [A],

l_c ... střední délka čtverečku ve směru indukčních čar [m]. [4]

Řešení válcového elektromagnetu – soloidu

Vypočítejte vlastní indukčnost cívky, která má N závitů, délku l a poloměr R . Cívkou protéká proud I podle **obr. 2.5.5**.

Při zanedbání okrajových jevů můžeme využít Ampérův zákon a určit magnetické pole uvnitř cívky pomocí rov.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l} = \mu_0 \cdot n \cdot I \quad (2.5.9)$$

Kde n/l je počet závitů vztažený na jednotku délky. Magnetický tok jednotlivými závity bude

$$\phi_B = B \cdot A = \mu_0 \cdot n \cdot I \cdot \pi \cdot R^2 \quad (2.5.10)$$

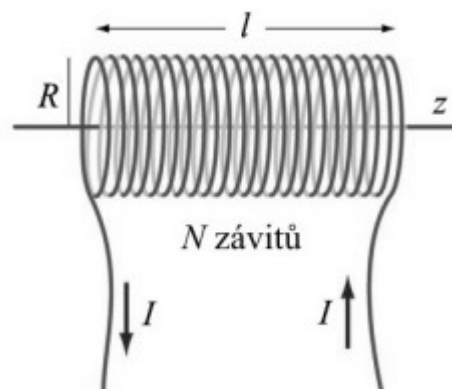
Potom vlastní indukčnost cívky je

$$L = \frac{N \cdot \phi_B}{I} = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot l \quad (2.5.11)$$

Z výsledného vzorce můžeme vidět, že vlastní indukčnost cívky je závislá na geometrických faktorech (n , R , l) a nezávislá na I [3]

2.5.2 Zákony platící pro elektromagnetické pole

Abychom si mohli v další kapitole probrat Maxwellovy rovnice, je potřeba se seznámit se základními zákony, které byly definovány pro elektromagnetické pole. Těmi jsou Coulombův zákon, Ampérův zákon, Biot - Savartův zákon, Lorentzova síla, Faradayův indukční zákon. [6]



obr. 2.5.5 - Válcový elektromagnet solenoid [3]

Coulombův zákon [6]

$$F = EQ_2 = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (2.5.12)$$

Coulomb svými pokusy a svým zákonem položil základ, podle kterého později Faraday navrhl grafický postup znázornění a výpočtu intenzity elektrického pole.

Abychom v Coulombově zákonu mohli vyjádřit i směr síly F , která je vektorem, musíme psát tento zákon:

$$F = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot R^3} \cdot R \quad (2.5.13)$$

R ... vektor vzdálenosti se začátkem v místě náboje Q_1 a koncem v místě náboje Q_2 ,

F ... síla působící na náboj Q_2 ,

ε ... permitivita vakua,

μ ... magnetická permeabilita.

Ampérův zákon [6]

„Jeden ampér je proud, který při stálém průtoku dvěma rovnoběžnými přímými, velmi dlouhými vodiči, zanedbatelného kruhového průřezu, umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 m od sebe, vyvolá mezi vodiči sílu $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na 1 m délky.“

$$F = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} I_1 \cdot L = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \frac{2 \cdot I}{r} I_1 \cdot L \quad (2.5.14)$$

I, I_1 ... proudy ve vodiči,

r ... vzdálenost mezi vodiči.

Biot - Savartův zákon [6]

$$dB = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \frac{I}{r^3} dl \times r \quad (2.5.15)$$

Lorentzova síla [6]

Lorentzova síla působí na libovolný náboj Q , pohybující se v magnetickém poli o indukci B rychlostí v . Jestliže se v daném místě s nimi nachází i elektrické pole E bude vzorec:

$$F = Q(E + v \times B) \quad (2.5.16)$$

Faradayův indukční zákon [6]

Faraday zjistil, že k indukování elektromotorického napětí dochází při časové změně magnetického indukčního toku.

Změní-li se magnetický indukční tok ve vodiči za dobu Δt o $\Delta \phi$, vzniká ve vodiči indukované elektromotorické napětí, jehož střední hodnota je

$$U_i = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (2.5.17)$$

2.6 Maxwellovy rovnice

Pro pochopení Maxwellových rovnic si musíme představit základní veličiny pole, které se skládají z jedné skalární a pěti vektorových veličin.

ρ ... objemová hustota náboje [C/m^3]

\vec{J} ... hustota vodivého proudu [A/m^2]

\vec{E} ... intenzita elektrického pole [V/m]

\vec{D} ... elektrická indukce [C/m^2]

\vec{H} ... intenzita magnetického pole [A/m]

\vec{B} ... magnetická indukce [T]

Toky vektorů \vec{J} , \vec{D} a \vec{B} procházející plochou S mají své označení a název:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \text{ - elektrický proud [A]} \quad (2.6.1)$$

$$\psi = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \text{ - elektrický indukční tok [C]} \quad (2.6.2)$$

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \text{ - magnetický indukční tok [Wb] [5] [6]} \quad (2.6.3)$$

Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru

Zákony platící pro elektromagnetické pole, jako jsou Coulombův zákon, Gaussova věta elektrostatiky, Ampérův zákon celkového proudu, Biot-Savartův zákon, zákon zachování náboje a Ohmův zákon, byly shrnuty Maxwellem do vzájemných obecných souvislostí a tvoří celek nazvaný jeho jménem. Existují dva tvary vyjadřování Maxwellových rovnic a to ve tvaru integrálním nebo diferenciálním.

1) Maxwellova rovnice

Představuje Ampérův zákon celkového proudu doplněný o posuvný proud.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i + \frac{d\psi}{dt} [A; A; C/s] \quad (2.6.4)$$

2) Maxwellova rovnice

Představuje Faradayův indukční zákon.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} [V; Wb/s] \quad (2.6.5)$$

3) Maxwellova rovnice

Představuje Gaussovu větu elektrostatiky pro tok elektrické indukce

$$\oint_S D \cdot dS = Q_0 [C] \quad (2.6.6)$$

4) Maxwellova rovnice

Představuje zákon kontinuity siločar magnetické indukce

$$\oint_S B \cdot dS = 0 [Wb] \quad (2.6.7)$$

Vektory E , H , B , D a J jsou mezi sebou propojeny složitými materiálovými vztahy. Jedná se o vztahy, které jsou též funkcemi fyzikálních veličin, jako je tlak, teplota atd.

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (2.6.8)$$

$$D = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (2.6.9)$$

$$J = \gamma \cdot E \quad (2.6.10)$$

μ_r ... relativní permeabilita [-],

μ_0 ... permeabilita vakua $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m],

ε_r ... relativní permitivita [-],

ε_0 ... permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m],

γ ... konduktiva prostředí. [5] [6]

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru

Místo integrálů v diferenciálních rovnicích vystupují jejich hustoty, tzn. hustota cirkulace vektorů H společně s hustotou vodivého proudu J a také hustotou posuvného proudu $\partial D / \partial t$, hustota magnetického posuvného proudu $\partial B / \partial t$.

$$\begin{aligned} \text{rot} H &= J_0 + \frac{\partial D}{\partial t} [A/m^2; A/m^2; C/m^2 \cdot s] \\ \text{rot} E &= -\frac{\partial B}{\partial t} [V/m^2; T/s] \\ \text{div} D &= \sigma_0 [C/m^3] \\ \text{div} B &= 0 [Wb/m^3] \end{aligned} \quad (2.6.11)$$

Zmíněné Maxwellovy rovnice jsou v diferenciálním tvaru základních rovnic pole a platí jen v regulárních bodech. Jedná se o body, kde jsou veličiny pole spojitě a spojitě diferencovatelné funkce polohy a času.

První dvě rovnice představují plošné hustoty, které jsou v A/m^2 , V/m^2 . Další dvě rovnice představují objemové hustoty s rozměrem C/m^3 a Wb/m^3 .

Výpočet s Maxwellovými rovnicemi v těchto tvarech je velice složitý a pracný. Pokud je možné některou z veličin zanedbat, dojde k velkému zjednodušení. Proto rozlišujeme samostatné skupiny úloh. [5] [6]

A) Pole STATICKÉ:

Jedná se o pole, kde jsou náboje v klidu, vektory pole jsou konstantní v čase, derivace podle času jsou nulové a proudy jsou také nulové. Dostáváme dvě nezávislé soustavy.

- I. $\text{rot } \mathbf{E} = 0, \text{div } \mathbf{D} = \rho, \mathbf{D} = \epsilon \cdot \mathbf{E}$
Pole elektrostatické, jehož zdrojem jsou náboje.
- II. $\text{rot } \mathbf{H} = 0, \text{div } \mathbf{B} = 0, \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$
Pole magnetostatické, nemá zdroje typu volných proudů a jedná se tak o popis pole permanentních magnetů [5]

B) Pole STACIONÁRNÍ:

Náboje v tomto poli se pohybují konstantní rychlostí \Rightarrow pole stejnosměrných proudů.

- I. $\text{rot } \mathbf{E} = 0, \text{div } \mathbf{D} = \rho, \mathbf{D} = \epsilon \cdot \mathbf{E}$
Tato soustava popisuje pole elektrické.
- II. $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}, \text{div } \mathbf{B} = 0, \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$
Magnetické pole je popsáno touto soustavou, protože $\text{div rot } \mathbf{H} = \text{div } \mathbf{J} = 0$ vznikne další systém
- III. $\text{div } \mathbf{J} = 0, \text{rot } \mathbf{E} = 0, \mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E}$
Tento systém popisuje stacionární pole ustálených proudů. Zdrojem jsou galvanické články mimo uvažovanou oblast. [5]

C) Pole KVAZISTACIONÁRNÍ:

V tomto poli můžeme zanedbat posuvné proudy. Vektory \mathbf{E} a \mathbf{B} jsou již spolu spjaty indukčním zákonem.

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{J}, \text{rot } \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t), \\ \text{div } \mathbf{D} &= \rho, \text{div } \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{D} &= \epsilon \cdot \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}, \mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E} \end{aligned} \quad [5]$$

3. Elektronové mikroskopy

Mikroskopy dělíme podle používaného záření k zobrazení předmětů na optické a elektronové. Optický mikroskop dosahuje maximálního zvětšení pouze 2000x, což určuje vlnová délka světla. Oproti tomuto způsobu nabízejí elektronové mikroskopy takové zvětšení, jež poslouží k rozpoznání jednotlivých atomů.

Elektronové mikroskopy se dělí:

- Transmisní elektronový mikroskop
- Rastrovací elektronový mikroskop [8]

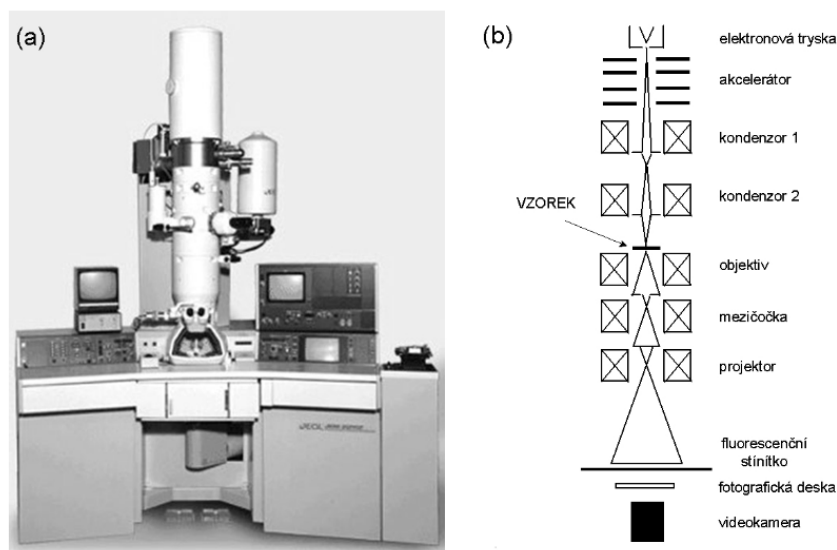
3.1 Transmisní elektronový mikroskop - TEM

E. Ruska a M. Knoll sestrojili v roce 1930 první transmisní elektronový mikroskop. Původně byl určen pro výzkum virů, ale později bylo jeho využití rozšířeno i do oblasti materiálového výzkumu. TEM je obdobou optického mikroskopu. Zdroj světla v optickém mikroskopu je zde nahrazen zdrojem elektronů (elektronové dělo), skleněné zaostřovací čočky jsou nahrazeny čočkami elektromagnetickými a namísto okuláru je zde fluorescenční stínítko. Celá dráha procházejících elektronů musí být umístěna ve vakuu, protože:

1. Ve vzduchu by byl elektron absorbován
2. Molekuly obsažené ve vzduchu by mohly kontaminovat tubus a vzorek [9] [17]

Základní konstrukce:

Skládá se ze čtyř hlavních částí: tubus s elektronovou optikou, vakuového systému, nezbytné elektroniky a software. Podrobnější popis součástí je na *obr. 3.1.1b*.



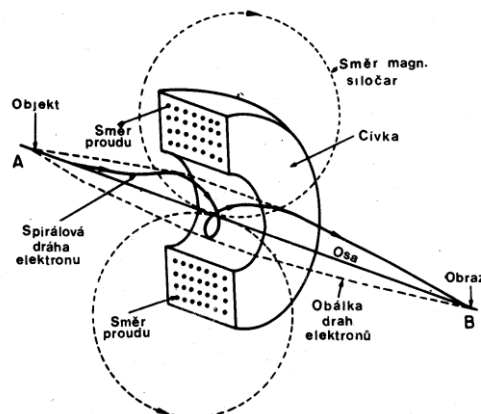
obr. 3.1.1 - Elektronový mikroskop a základní součásti [9]

Elektromagnetické čočky:

Působení magnetického pole na dráhu letícího elektronu lze využít k sestrojení elektromagnetické čočky, která by fungovala přibližně stejně, jako skleněná čočka v případě světla. Nejjednodušší elektromagnetickou čočkou je solenoid - kruhová cívka **obr. 2.5.5**, ve které a okolo které při průchodu elektrického proudu vzniká magnetické pole, jehož siločáry uvnitř cívky jsou rovnoběžné s osou cívky a vně jsou zakřivené. Na **obr. 3.1.2** je zakresleno, jak magnetické pole solenoidu ovlivňuje dráhy elektronů, které vycházejí z bodového zdroje **A**. Po zakřivení jejich drah v magnetickém poli cívky, opět protínají osu v bodě **B**. Účinnost jednoduchého solenoidu, byla zvýšena tím, že cívka byla obklopena vrstvou měkkého železa, které je schopno koncentrovat siločáry do prostoru pólových nástavců. Silnější magnetické pole cívky znamená kratší ohniskovou délku a tedy celkově výkonnější a kvalitnější čočku.

Elektromagnetické čočky mohou mít stejné vady jako čočky optické:

- Sférická (kulová) vada
- Chromatická (barevná) vada
- Astigmatismus [9] [17]



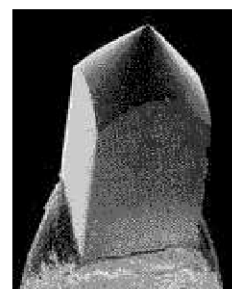
obr. 3.1.2 - Elektromagnetická čočka [17]

Elektronové dělo:

Skládá se z katody, tzv. Wehneltova válce, a anody. Wolframové vlákno (**obr. 3.1.3a**) přímo žhavené na teplotu 2800 °C je využívá jako katoda. Existují ještě dva mnohem jasnější zdroje elektronů. Prvním z nich je elektronová tryska na bázi hexaboridu lanthanu (**obr. 3.1.3b**), emitující 10x více elektronů než wolfram zahřátý na stejnou teplotu. Dalším zdrojem elektronů je tryska emitující elektrony vlivem elektrického pole (field emission gun – FEG). Zde jsou elektrony vysávány z velmi ostrého hrotu silným elektrickým polem. U tohoto zdroje elektronů je možno dosáhnout až 1000x větší hustoty elektronů.



a



b

obr. 3.1.3 - Elektronová děla [17]

Od elektronového zdroje se vyžaduje, aby poskytoval koherentní svazek elektronů. Ve výsledku to znamená, že by měly elektrony vycházet z bodového zdroje se stejnou energií a jejich průvodní vlna by se měla nacházet ve stejné fázi. Tryska je tvořena katodou emitující elektrony a anoda s kruhovým otvorem ve svém středu, která uděluje elektronům dostatečnou rychlost na průlet tubusem mikroskopu. [9] [17]

Zobrazovací soustava:

Soustava je tvořena držákem preparátu, objektivem, mezičočkami, projekтивy a fluorescenčním stínítkem. Do držáku jsou vkládány síťky se vzorky. Díky držáku a motorkům je možné vzorek velmi jemně posouvat a případně ho i naklánět.

Srdcem celého elektron-optického systému je objektiv, což je nejvýkonnější čočka mikroskopu. Umožňuje největší zvětšení a má také nejkratší ohniskovou vzdálenost. Cívka objektivu má velký počet závitů, kterými protéká značný proud a to vše z důvodu dosažení požadovaného výkonu. Objektiv bývá chlazen vodou, aby nedocházelo k jeho přehřívání.

Těsně pod vzorkem, umístěným na síťce, je potřeba umístit objektivovou clonu, která snižuje sférickou vadu objektivu a zvyšuje se tím i kontrast výsledného obrazu.

Aby bylo možné sledovat elektrony procházející vzorkem a zobrazovacím systémem, je potřeba informace převést do oblasti viditelného světla. Z tohoto důvodu je na dně tubusu umístěno stínítko pokryté ZnS, který je schopen v závislosti na energii a množství dopadajících elektronů emitovat světlo s vlnovou délkou 450 nm. Kvůli nečistotám je emise posunuta k 550 nm což odpovídá zelenému světlu. [17]

Dopad elektronů:

a) Amplitudový kontrast obrazu

Absorbce některých elektronů, která závisí na tloušťce a složení vzorku.

b) Fázový kontrast obrazu

Rozptýlení elektronů pod malými úhly

c) Difrakční kontrast obrazu

Rozptýlení elektronů do velmi odlišných směrů. Hlavně v krystalických vzorcích.

d) Zpětně rozptýlené elektrony

Odražení některých dopadajících elektronů.

e) Sekundární elektrony

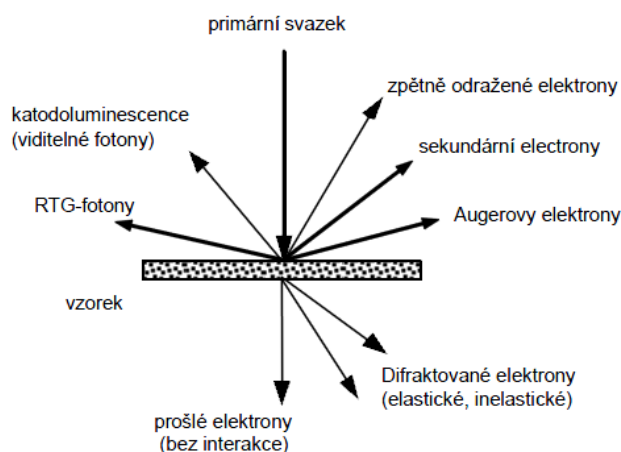
Dopad elektronů na vzorek může způsobit emisi elektronů z vlastního vzorku.

f) RTG fotony

Dopadající elektrony mohou způsobit emisi rentgenových paprsků.

g) Katodoluminescence

Někdy mohou vyvolat elektrony emisi fotonů (světla) ze vzorku. [9] [17]



obr. 3.1.4 - Možnosti odrazů elektronů [9]

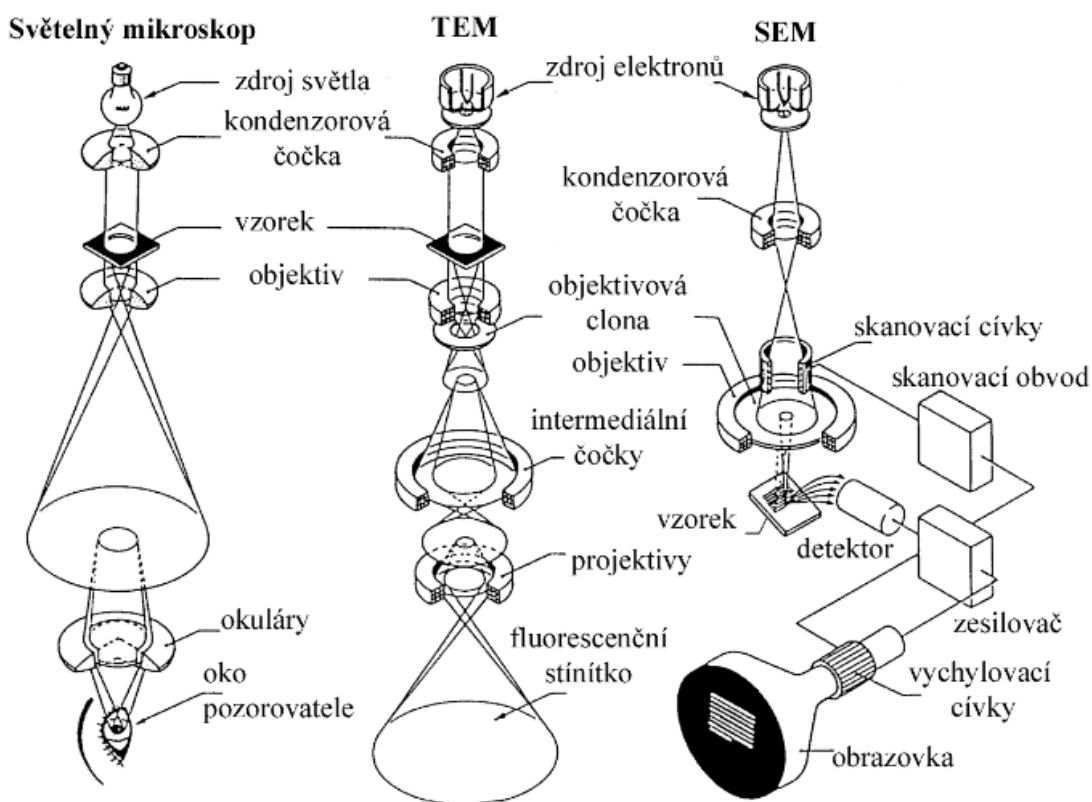
Záznam obrazu:

Na fotografický materiál – pod stínítkem TEM se nachází fotografická komora s fotografickými filmy. Tyto filmy jsou vyrobeny z materiálů, které mají citlivost pro záznam velmi krátkých vln a také musí vydržet vysoké vakuum. Při pořizování se odkloní stínítko a najede pouzdro s filmem, na který mohou přímo dopadat elektrony. Po expozici zářením dojde k vytvoření obrazu.

Digitální záznam – jedná se o přímý přenos obrazu v digitální podobě do počítače k následnému zpracování obrazu a analýze. Funguje na principu vložení detektoru do dráhy elektronového svazku. Tento detektor zaznamenává množství primárních elektronů a jejich energii v závislosti na daném místě dopadu na detektor. Detektor by neměl degradovat rozlišení elektronového obrazu a neměl by přidávat žádný šum. Používají se dva typy CCD kamer, a to Moradu a KeenView. [17]

3.2 Rastrovací elektronový mikroskop - SEM

Tento elektronový mikroskop pracuje s tenkým svazkem elektronů, které dopadají na všechna místa vzorku a to po řádcích a postupně zaznamenává odražené elektrony. Primárně určený k pozorování povrchů vzorků. Hlavní rozdíl mezi transmisním a rastrovacím elektronovým mikroskopem je v tom, že u transmisního prochází elektrony skrz materiálovou strukturu daného vzorku a proud elektronů je na velké ploše vyslán k tomuto vzorku. Oproti tomu rastrovací má malou šířku proudu elektronů a nezaznamenávají se elektrony procházející skrz, ale elektrony sekundární.



obr. 3.2.1 - Používané elektronové mikroskopy [17]

Elektronová děla se u tohoto přístroje používají stejná jako u transmisního elektronového mikroskopu. Hlavním úkolem v soustavě elektromagnetických čoček je zúžit procházející tok elektronů, aby mohly na daném vzorku zabírat co nejmenší plochu a mohlo probíhat rastrování vzorku.

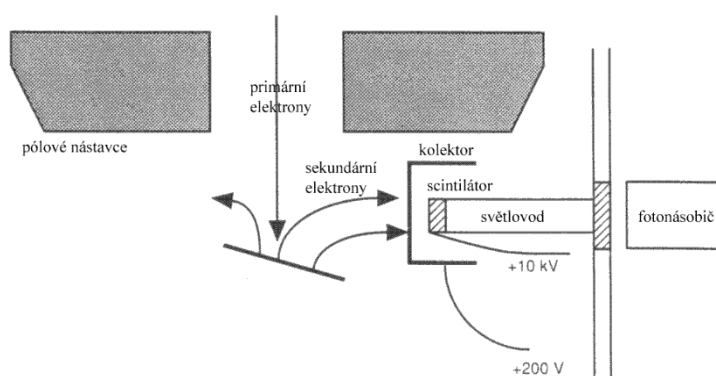
Elektromagnetickými čočkami zkoncentrovaný paprsek elektronů je před dopadem na vzorek rozpohybován vychylovacími cívkami, tak aby mohlo probíhat řádkování daného vzorku. Počet těchto řádků je možné měnit od desítek až po několik tisíc. Zároveň je možné měnit i rychlost přeběhu paprsku v jednom řádku. Aby byl fotografický záznam kvalitní, je nutný co nejpomalejší pohyb paprsku po vzorku. Získání celého obrazu může trvat 30, 60 i 120 s. [13] [17]

Detekce:

Detektor sekundárních elektronů je prostředníkem mezi dějem, odehrávajícím se při interakci primárních elektronů s povrchem preparátu, při kterém dochází k uvolnění sekundárních elektronů, a obrazovkou mikroskopu, na kterou přenáší informace získané zachycením sekundárních elektronů o topografickém kontrastu preparátu.

Detektor sekundárních elektronů podle Everhart –Thornley

- tvořen scintilátorem, který po dopadu elektronů uvolní záblesk světla ze středu viditelné oblasti (550 - 650 nm), jehož intenzita je přímo úměrná energii elektronů, které ho vyvolaly
- světlo je dále vedeno světlovodem a komoru SEM opustí průchodem křemenným okénkem
- mimo vakuum je umístěn fotonásobič, který zachytí světelný signál a převede je na elektrický, přičemž dojde k zesílení signálu zhruba 1000 až 1000000 krát [13] [17]



obr. 3.2.2 - Odrazy elektronů u SEM [17]

Druhy dopadů elektronů na vzorek jsou shodné jako u transmisního elektronového mikroskopu. Zde ovšem záleží, jestli je daný mikroskop vybaven detektory, které jsou schopny rozlišit všechny druhy záření vzniklé při interakci elektronového paprsku se vzorkem.

4. Možnosti a principy měření magnetických polí

Tato kapitola popisuje metody a přístroje, které se využívají v technické praxi pro měření magnetického pole v dostatečné vzdálenosti od feromagnetických předmětů. Platí zde vztah mezi intenzitou a indukcí magnetického pole $B = \mu_0 \cdot H$.

Většinou se používá jednotek magnetické indukce T (Tesla). Velice často se můžeme setkat s jednotkou Gauss ($1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$) a to především v anglicky mluvících zemích. Přístroje pro měření magnetického pole nazýváme teslametry, někdy také magnetometry. Označením „Gaussmetr“ se většinou popisují přístroje, které pracují s Hallovými sondami a používají se k měření intenzity magnetického pole i v těsné blízkosti feromagnetických materiálů. [21] [22]

4.1 Indukční čidla

Základ těchto přístrojů je položen na Faradayově indukčním zákonu.

$$u_i = \frac{d\Phi_c}{dt} = N \cdot \frac{d}{dt} (S \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot H_0) \quad (4.1.1)$$

u_i ... indukované napětí [V],

Φ_c ... cívkový tok [Wb],

S ... střední plocha cívky [m^2],

N ... počet závitů snímacího vinutí,

μ ... permeabilita prostředí (ve vzduchu $\mu=1$),

H_0 ... intenzita měřeného pole [A/m].

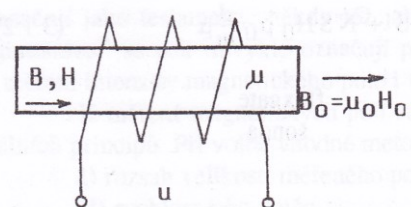
Rozepsáním derivace ze vztahu (4.1.1) dostaneme základní vztahy pro jednotlivé druhy indukčních čidel: [4]

Indukční cívka	Rotační cívka	Fluxgate sonda	
$u_i = N \cdot S \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{d}{dt} H_0 + N \cdot H_0 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{d}{dt} S + N \cdot S \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{d}{dt} \mu$			(4.1.2)

4.1.1 Indukční cívka

A) Vzduchová cívka

Nejčastěji používaným typem je vícevrstvá válcová cívka. Pro případ nehomogenního pole měří přibližně průměrnou hodnotu magnetické indukce ve svém objemu. Ovšem pro tento případ by byla nejlepší cívka kulová, která měří bodovou hodnotu pole ve svém středu, ale tato cívka je v praxi velice těžko realizovatelná.



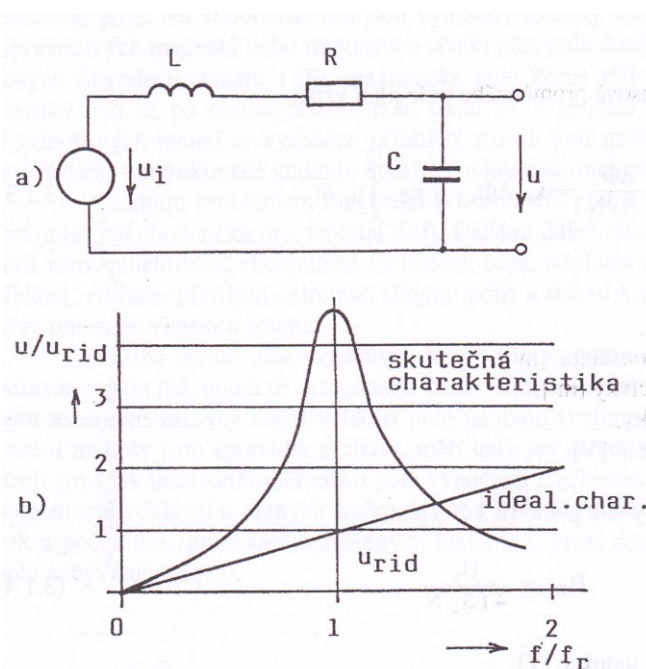
obr. 4.1.1 - Vzduchová cívka [4]

Náhradní schéma indukční cívky je na **obr. 4.1.2a**. Jedná se o obvod s rozloženými parametry, který je frekvenčně závislý. Kmitočtová závislost citlivosti indukční cívky v okolí nejnižšího rezonančního obvodu je na **obr. 4.1.2b** pro napětový výstup.

Výrobce:

Firma MEDA (USA).

Magnetometr ACM-1 s indukční vzduchovou cívku o průměru 45 cm a délce 2,5 cm, obsahuje také nízkošumový I/U převodník zabudovaný do krytu cívky. Citlivost 25 mV/nT. [4]



obr. 4.1.2 - Náhradní schéma indukční cívky [4]

B) Cívka s jádrem

Použitím feromagnetického jádra dochází ke zvyšování citlivosti, ale vede však ke vzniku nelinearit a zhoršení teplotních a kmitočtových závislostí měřicích parametrů cívky. Použití této měřicí cívky je výhradně jen k měření velmi slabých polí na nízkých kmitočtech.

Výrobce:

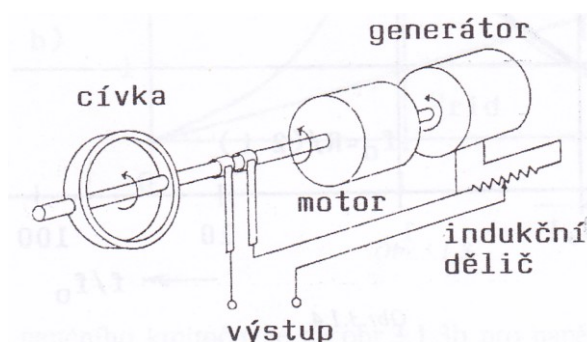
Firma MEDA

Délka permalloyového jádra je 2 m, průměr 20 mm. Měřicí cívka je dlouhá 1 m, počet závitů cívky je 100 000, ohmický odpor 3 kΩ. Použití v režimu naprázdno. Sonda má silně nelineární kmitočtovou závislost i v oblasti nízkých kmitočtů, proto je nutné ji softwarově korigovat. S nízkošumovým zesilovačem je schopna detekovat pulsní pole 10 pT s dobou trvání pod 10 s. [4]

4.1.2 Rotační a vibrační cívky

A) Magnetometr s rotační cívku

Vyazuje vynikající dlouhodobou stabilitu. Na druhou stranu má ovšem nízkou spolehlivost kvůli pohyblivým dílům a kartáčům, navíc vyazuje také vysokou spotřebu.



obr. 4.1.3 - Magnetometr s rotační cívku [4]

Výrobce:

Firma Rawson-Lush (USA)

Přístroj s cívkou, kterou pohání stíněný elektromotor s rozsahy 50 nT až 20 mT. Nejcitlivější model má rozlišení 0,1 nT. Celková přesnost přístrojů je 0,01 %, rozlišení 5 nT. Principiální schéma je na **obr. 4.1.3**.

Firma Geofyzika Brno

Magnetometr Rocoma používá pohon stlačeným vzduchem. Používá cívku o průměru 20 mm uloženou v ložiscích a s pohyblivými kontakty realizovanými jako hroty v ose cívky ponořené do rtuti. Při rychlosti otáčení 20 000 ot./min je citlivost 4 V/nT. Přesnost konstanty je 1 %. [4]

B) Magnetometr s vibrační cívkou

Měří převážně gradient pole, lineární pohyb cívky je vyvoláván např. piezoelektrickým měničem. Použití těchto magnetometrů bylo pro měření magnetických vlastností vzorků, dnes se však obvykle používá metoda vibrujícího vzorku. [4]

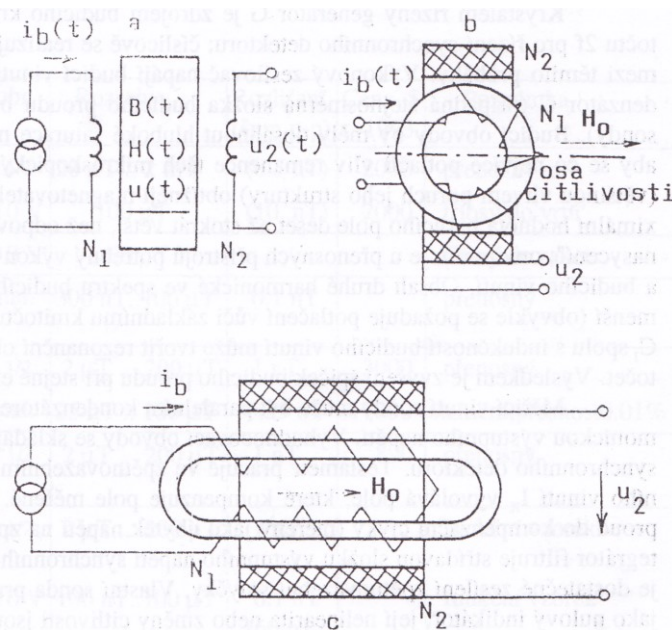
4.1.3 Feromagnetické sondy (fluxgate)

Základní princip vychází ze vztahu (4.1.2) pro fluxgate a **obr. 4.1.4a**. Sonda je uspořádána podle **obr. 4.1.4b a c**. Jádru tvarované do toroidu nebo oválu je buzené proudem $i_b(t)$ s velkou amplitudou. Permeabilita je modulována s dvojnásobnou frekvencí (permeabilita je sudá funkce intenzity budícího pole). Za nepřítomnosti vnějšího pole H_0 bude výsledný tok snímáný cívkou nulový, a proto nebude docházet k indukování napětí v cívce. Za přítomnosti stejnosměrného vnějšího měřeného pole H_0 se již bude do snímací cívky indukovat napětí s dvojnásobnou frekvencí $2f$.

Některé vyráběné teslametry:

Sonda RTKV – vyráběná na ČVUT Praha.

Teslametr s feromagnetickou sondou [4] [7]



obr. 4.1.4 - Feromagnetická sonda a její uspořádání [4]

tab. 4.1.1 - Základní parametry některých vyráběných fluxgate Teslametrů [4]

MODEL (Výrobce)	Zobraz.	Rozsahy	Rozlišení (šum p-p)
MAG03 (Hela)	± 10 V	60 μ T	
Lab. Teslametr (ČVUT FEL)	± 10 V	100 nT ... 100 μ T	0.1 nT (60 pT)
Magnetoscop 1.068 (Foerster)	Anal.	300 nT ... 100 μ T	0.1 nT

4.2 Magnetogalvanická čidla

Jedná se o čidla, jejichž hlavním principem je zjišťování, jak působí magnetické pole na nosiče proudu v polovodičích.

4.2.1 Hallova sonda

Hallovo napětí U_H [V]:

$$U_H = R \cdot \frac{I}{d} B \quad (4.2.1)$$

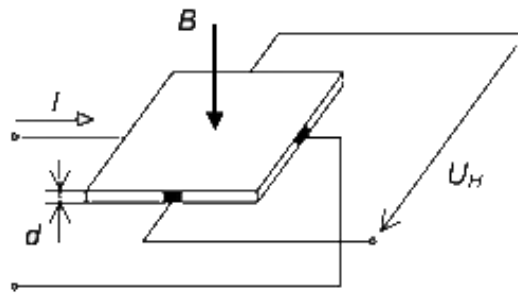
d ... tloušťka vzorku [m],

R ... Hallova konstanta [Ω m/T],

I ... pomocný proud [A],

B ... indukce měřeného pole [T].

Hallova sonda využívá Hallova jevu, který se ve zvýšené míře projevuje u polovodičů. Sonda je tvořena tenkou polovodičovou destičkou, kterou prochází jedním směrem stejnosměrný proud. Při vložení destičky do magnetického pole působí na nosiče náboje Lorenzova síla, která vychyluje jejich dráhy ve směru kolmém k vektoru magnetické indukce B a pohybu těchto nábojů. Tento jev zapříčiňuje vznik Hallova napětí U_H na protilehlých stranách destičky.



obr. 4.2.1 - Hallova sonda

Sondy mohou pracovat v širokém rozsahu teplot. Neobsahují feromagnetikum, proto se s nimi dá měřit v těsné blízkosti feromagnetik. Použitelnost pro měření polí od 1 mT do 1 T. Pro slabší pole se hodí čidla z antimonidu india. Velikost aktivní plochy může být od 0,5x1 mm u bodových čidel až po několik mm² u sond pro měření slabých polí. [4] [7]

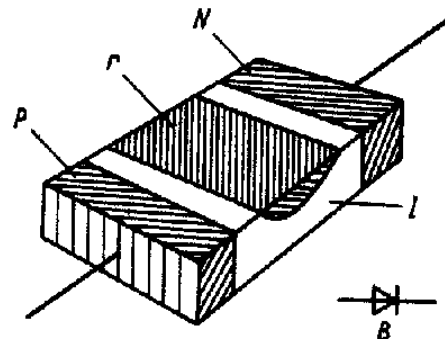
tab. 4.2.1 - Výrobci Hallových sond a jejich parametry[4]

Typ	Výrobce	Prac. proud	Citlivost	Rozměry
H32	Hirst	100 mA	130 mV/T	6 x 6 x 1,5 mm
FA24	Siemens	400 mA	300 mV/T	6 x 13 x 1 mm
SBV525	Siemens	100 mA	97 mV/T	2 x 1 x 0,3 mm

4.2.2 Magnetodiody

Základní strukturu magnetodiody ukazuje **obr. 4.2.2**. Pracuje na principu ovládání efektivní doby života nadbytečných nosičů náboje vnějším magnetickým polem. Tento jev se označuje jako magnetodiodový.

Magnetodiody je tvořena např. z kvádrů germania, který má na jednom konci vodivost P a na druhém N. Základní materiál má vlastní vodivost (oblast I), přičemž okrajová oblast r je vytvořena takovým způsobem, že se v ní objevuje vyšší počet rekombinací než v samotné oblasti I. Budou-li nosiče nábojů pohybující se mezi oblastmi P a N vychýleny magnetickým polem vlivem Hallova jevu do oblasti r, nastane větší rekombinace a zvětší se odpor.



obr. 4.2.2 - Magnetodiody

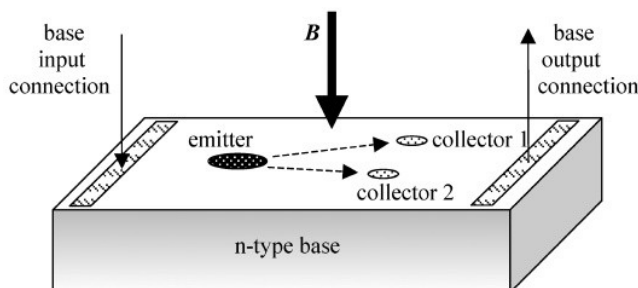
Napájením konstantním proudem můžeme dosáhnout až o řád vyšší citlivosti oproti Hallovy sondy stejných rozměrů, avšak velice podstatnou nevýhodou magnetodiod je jejich malá linearita, kvůli které se již v nových přístrojích nepoužívají.

Výrobce:

Firma SONY [4]

4.2.3 Magnetotranzistor

Magnetotranzistor (magnistor) je tranzistor závislý na magnetickém poli, který má dva kolektory. Pokud neexistuje magnetické pole, jsou oba kolektorové proudy stejné. Nachází-li se tranzistor v magnetickém poli v důsledku Hallova jevu, způsobujícího odchýlení nosičů nábojů v závislosti na směru magnetického pole, bude jeden proud větší a druhý menší. Budou-li oba proudy procházet přes rezistory se stejným odporem, na nichž se vytvoří úměrně velký úbytek napětí, vznikne mezi oběma kolektory rozdílové napětí, které je úměrné velikosti magnetické indukce a směru magnetického pole. [4][7]



obr. 4.2.3 - Magnetotranzistor

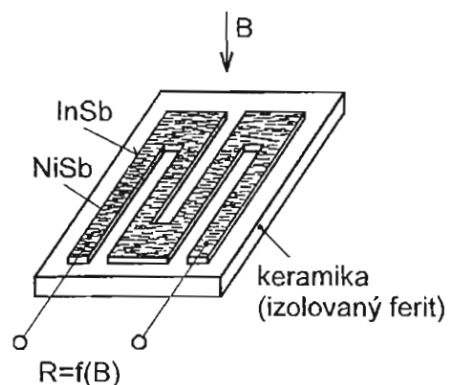
4.2.4 Magnetorezistor

Magnetorezistor je rezistor, jehož odpor je závislý na magnetické indukci. Na **obr. 4.2.4** je ukázána principiální stavba takové součástky. Nejčastěji obsahuje antimonid inda s jehličkami antimonidu niklu. Jehličky mají tloušťku 1 μm , délku do 50 μm a jejich vzdálenost je 1 až 100 μm . Při přiložení elektrického napětí se nosiče náboje pohybují přímočaře tělískem, pokud nepůsobí magnetické pole. Existuje-li kolmo k elektrickému poli magnetické pole B , budou podle Halla nosiče náboje, v polovodičovém materiálu silně vychylovány. Při vstupu do jehliček NiSb se budou vracet

zpět; budou se tedy pohybovat příčně k elektrickému poli, protože částice NiSb jsou elektricky silně vodivé, tj. intenzita elektrického pole je v příčném směru nulová a rozdělení nosičů náboje bude rovnoměrné. Tím budou v závislosti na magnetické indukci prodlouženy proudové dráhy, což v souladu se vztahem $R \sim l$ (délka vodiče) odpovídá zvětšení odporu. [4] [7]

Výrobce:

Firma Siemens



obr. 4.2.4 – Magnetorezistor [7]

tab. 4.2.2 - Magnetorezistory od firmy Siemens[4]

Typ	$R (0)$	Aktivní plocha
FP30D250E	250 Ω	2 x 1 mm
FP17L200E	200 Ω	2 x 2,4 mm
FP30N60E	60 Ω	2 x 1 mm

5. Magnetické čočky

Obecně lze za magnetické čočky považovat magnetická pole, kterými je možno realizovat elektronové optické zobrazení. Homogenní magnetické pole je schopno fokusovat nabitě částice. Nehomogenní, magnetostatické, osově souměrné pole může vytvořit čočky s velkou optickou mohutností. [10] [11] [12] [13]

5.1 Elektronový svazek

Elektrony se objevují v látkách ve vázaném stavu. Mohou být obsaženy ve slupkách atomů nebo v pevných látkách jako elektronový plyn. Aby šlo elektron uvolnit, je potřeba látce dodat kinetickou energii, která by dokázala překonat potenciální energii vazby. V současné době se elektrony získávají z pevných látek, kterým je potřeba dodat přídatnou energii W_A , nazývanou též vstupní práce. Podle způsobu uvolňování elektronů z pevných látek můžeme dělit procesy emise:

- a) **Termoemisi** – použitím dostatečně vysoké teploty
- b) **Fotoemisi** – dodání energie formou elektromagnetického záření
- c) **Autoemisi** – použití dostatečně silného elektrostatického pole na povrchu materiálu

Vlnové elektrony, které představují elektrický proud, jsou záporně nabitě částice s nábojem $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C a hmotností $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg. O elektronový svazek se jedná, jestliže je velký počet pohybujících se elektronů koncentrován. Koncentraci elektronů ve svazek, jeho urychlování a další řízení se provádí elektrickým a magnetickým polem. Působením tohoto rotačně souměrného pole lze docílit soustředění elektronového svazku do velmi malého průřezu.

Široké uplatnění nalézají elektronové svazky v elektronových mikroskopech a to hlavně kvůli poměrně snadnému ovládání elektrickým nebo magnetickým polem. Dále také kvůli velmi malé vlnové délce, která při vysokých rychlostech umožňuje zobrazení předmětů malých rozměrů.

V každém technologickém procesu využívajícím elektronový svazek je potřeba mít v pracovním prostoru vakuum. V tomto prostoru s vakuem se umísťuje jak zdroj elektronů (elektronové dělo), tak materiál, na který elektronový svazek dopadá. Urychlování elektronů je zajištěno elektrostatickým polem a fokusování a vychylování je zajištěno polem elektrickým a magnetickým.

Vliv magnetického pole na pohybující se elektron

Magnetické pole může působit pouze na pohybující se elektrický náboj, jelikož při jeho pohybu vzniká magnetické pole. Síla, která na něj působí, musí být úměrná rychlosti pohybu náboje. Oproti tomu musí být však tato síla tím větší, čím větší je intenzita magnetického pole. Z toho vyplývá vzorec pro sílu působící na elektron pohybující se v magnetickém poli.

$$F_m = k \cdot e \cdot v \cdot H \quad (5.1.1)$$

k ... koeficient úměrnosti,

e ... náboj elektronu,

v ... rychlost elektronu,

H ... intenzita magnetického pole.

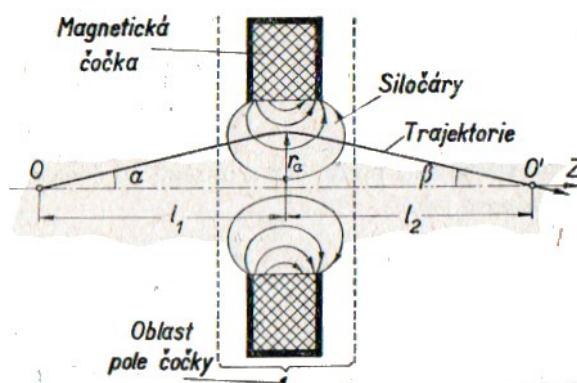
Náboj po průletu magnetickým polem nemění svou rychlost, jelikož magnetické pole náboji nepředává energii, avšak mění směr vektoru rychlosti. Vektor síly F_m musí být v každém okamžiku kolmý na vektor rychlosti v . [10] [11] [12] [13]

5.2 Typy používaných magnetických čoček

Existují dva základní typy magnetických čoček. Prvním z nich je dlouhá magnetická čočka. Jedná se o solenoid, jehož zvětšení je 1(jedna). Proto jej nepovažujeme za čočku v pravém slova smyslu. Největším problémem u této čočky je fakt, že předmět i obraz leží v oblasti pole.

Na rozdíl od dlouhé magnetické čočky existuje i čočka krátká (**obr. 5.2.1**). Jedná se v podstatě o rotačně symetrické magnetické pole, které je vytvářeno krátkým solenoidem. Její fokusační vlastnosti se výrazně liší od dlouhé čočky, neboť předmět i obraz leží mimo pole a také dokáže fokusovat nejen paprsky vstupující do pole nerovnoběžně s osou, ale i paprsky rovnoběžné.

Krátká čočka slouží pro vytvoření zvětšeného obrazu předmětu, kdy toto zvětšení závisí na vzdálenosti předmětu a obrazu od čočky a dále na ohniskové dálce čočky.

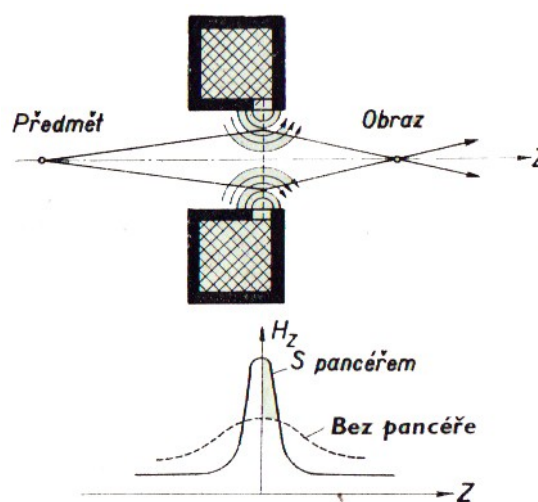


obr. 5.2.1 - Krátká magnetická čočka [10]

Krátká a slabá magnetická čočka je vždy spojná a její optická mohutnost je tím větší, čím menší je rychlost vstupujících elektronů do čočky a dále čím větší je intenzita magnetického pole na ose cívky. I velice malá změna intenzity magnetického pole podstatně ovlivňuje její optickou mohutnost.

K dosažení velké optické mohutnosti je potřeba silného magnetického pole soustředěného na krátkém úseku osy. Vložením cívky do železného krytu s úzkou kruhovou štěrbinou vzniká ve štěrbině silné magnetické pole. Kryt je nazýván pancéř. Na **obr. 5.2.2** je znázorněna tato cívka i s průběhem intenzity magnetického pole. Pro porovnání je v grafu znázorněn čárkovanou čarou i průběh intenzity pole cívky bez pancéře.

Pancéřová magnetická čočka, vyobrazena na **obr. 5.2.2**, má silné magnetické pole soustředěno na velice malém úseku osy, čímž se dosáhlo snížení

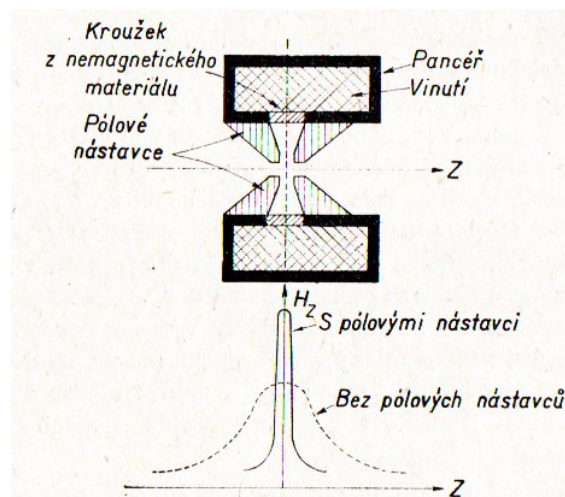


obr. 5.2.2 - Pancéřová magnetická čočka [10]

proudu potřebného k fokusaci oproti cívce bez krytu o 30%. Také se jedná o první magnetickou čočku, kterou bylo možné dosáhnout silně zvětšených elektronových obrazů. Byla použita v elektronovém mikroskopu a bylo možno dosahovat ohniskových dálek až několik centimetrů.

Ke zmenšení ohniskové dálky lze využít dvě možné cesty. První z nich je zvětšování magnetomotorické síly nebo zmenšování rozměrů čočky. Nelze ovšem zmenšovat rozměr čočky a přitom zvyšovat proud cívkou bez omezení, neboť je omezována svým dovoleným zatížením. Tento problém se dá odstranit použitím pólových nástavců vyrobených ze zvláštního druhu oceli (**obr. 5.2.3**). Tyto nástavce, aniž by se měnil rozměr cívky, velice zmenšují průměr a šířku štěrbiny. Tím se zesiluje a koncentruje magnetické pole.

S využitím pólových nástavců lze dosáhnout ohniskových dálek kratších než 1mm. Tato ohnisková délka je přibližně stejná jako šířka štěrbiny pólových nástavců. Rozhodující vliv na fokusační vlastnosti čočky a její ohniskové dálky má tvar pólových nástavců, průměr otvoru a velikost štěrbiny. Pólové nástavce mohou být umístěny ve středu cívky nebo na jejím konci, což je varianta využívaná v elektronovém mikroskopu. [10] [12] [13] [17]



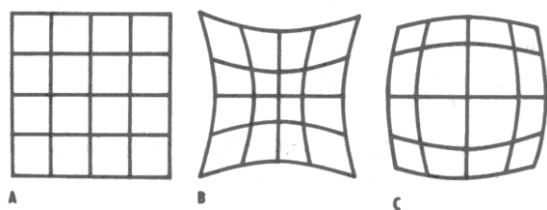
obr. 5.2.3 - Magnetická čočka s pólovými nástavci [10]

5.3 Vady čoček

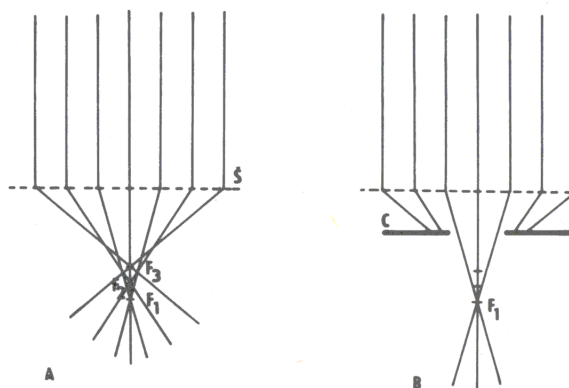
Stejnými vadami jaké vykazují skleněné čočky, jsou postiženy i čočky elektromagnetické. Proto nelze v praxi dosahovat teoretické rozlišovací schopnosti elektronového mikroskopu. Všechny vady můžeme rozdělit do tří skupin, kterou tvoří vady sférické, chromatické a astigmatismus.

A) Sférické vady

Jsou způsobeny tím, že skutečné dráhy elektronů nevyhovují principu rovnosti optických drah. Jedná se vlastně o neschopnost čočky zaostřovat všechny paprsky vycházející z bodového zdroje opět do jednoho bodu. Elektrony, procházející vnější částí čočky, jsou zaostřovány do bodu, který leží blíž k čočce než elektrony, které procházejí čočkou v těsné blízkosti optické osy (**obr. 5.3.2**). Praktickým důsledkem této vady je, že zvětšení v krajích obrazu je jiné než v jeho středu (**obr. 5.3.1**). Velikost sférické vady je závislá na ohniskové vzdálenosti čočky, a je tím větší, čím větší je tato vzdálenost. Omezuje se odstraněním okrajových paprsků pomocí clony.



obr. 5.3.1 - Důsledky sférické vady [17]



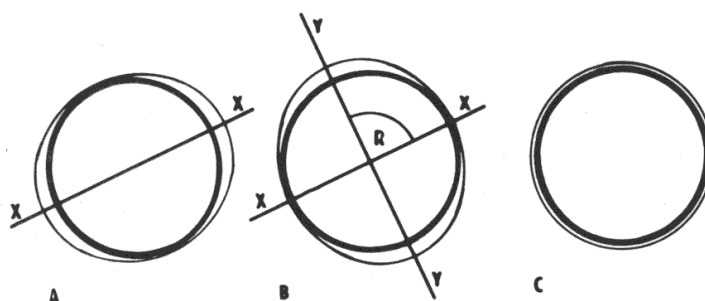
obr. 5.3.2 - Vznik sférické vady [17]

B) Chromatické vady

Vznikají v důsledku rozdílných energií elektronů ve svazku. Pomalejší elektrony s větší vlnovou délkou jsou v magnetickém poli cívek vychylovány jinak a protínají osu cívky v jiném bodě, než elektrony s vyšší rychlostí. Snížení chromatické vady je možné docílit zlepšením koherentnosti a monochromaticnosti elektronového svazku, čehož lze dosáhnout maximální stabilizací urychlovacího napětí mikroskopu. Odstranit zcela tuto vadu nelze, neboť ke změnám energie elektronů dochází při samotné interakci elektronů s preparátem a výrazně se tato vada projevuje v případech silnějších řezů.

C) Astigmatismus

Je způsobený nesymetrií magnetického pole. V důsledku toho elektrony procházející čočkou v různých rovinách, mají různé ohnisko (**obr. 5.3.3**). Nejčastějším zdrojem astigmatismus jsou nečistoty na vnitřních plochách mikroskopu - pólových nástavcích čoček, clonách apod. Nečistoty, které jsou většinou elektricky nevodivé, se nabíjejí a svým rušivým elektrickým polem způsobují změny v drahách elektronů. Astigmatismus se v mikroskopu koriguje magnetickým polem stigmátoru, jehož nastavení se koriguje v případě SEM i několikrát denně. Dokonalá korekce je při větších zvětšeních v TEM nutnou podmínkou k získání uspokojivých výsledků [10] [11] [17]



obr. 5.3.3 – Astigmatismus [17]

6. Příprava a realizace virtuálního měřicího pracoviště

V praktické části diplomové práce jsem pracoval na realizaci virtuálního měřicího pracoviště, které uživateli zjednoduší práci při měření magnetických polí. Dalším krokem praktické části byla realizace samotného měření dvou typových elektromagnetických soustav s využitím tohoto vytvořeného virtuálního měřicího pracoviště. Důraz byl kladen na obecné pojetí celého zpracování programu, aby mohl být využíván při výuce a měření magnetických polí studenty.

Při přípravě virtuálního měřicího pracoviště byly definovány hlavní požadavky kladené na program a jeho programovou strukturu.

- Schopnost měřit na dvou kanálech pomocí měřicí karty
- Přepočet vstupujících napětí na hodnoty proudu, magnetické indukce a intenzity magnetického pole
- Zápis dat do tabulky hodnot, zobrazované na čelním panelu uživateli
- Zobrazení měřených průběhů do grafu na čelním panelu
- Při střídavém napájení obvodu provést výpočet a zobrazení FFT spektra
- Ukládání do textového souboru s možností nastavení automatického uložení po dobu 1 minuty, 30 sekund nebo 10 sekund.
- Provádění nastavení vzorkovací frekvence a počtu vzorků za sekundu při měření

Realizace programu ve vývojovém prostředí LabVIEWTM, probíhala na bázi grafického programování, se kterým jsem měl již možnost pracovat při realizaci bakalářské práce. Jedná se o velice odlišný druh programování v porovnání s klasickým psaným kódem programu, které umožňuje nepřeberné možnosti v oblasti měřicí a zobrazovací techniky. Čelní panel nám umožňuje variabilně proměňovat vizuální prostředí uživatele. Uzpůsobovat ho pro lepší orientaci nebo zvýrazňovat podstatné věci při měření. Do značné míry jsme při programování omezeni typem používaných periférií pro sběr dat, jelikož typ používané karty určuje, s jakými daty budeme pracovat.

Samotné měření na dvou typech elektromagnetických soustav je zařazeno na konec této kapitoly. Při měření bylo realizováno zapojení s použitím stejnosměrného napájení celého obvodu, odporového můstku, na kterém byl měřen úbytek napětí odpovídající velikosti proudu protékajícího cívkou elektromagnetu, elektromagnet a axiální měřicí sonda zapojená do Teslametru, měřicího magnetickou indukci posílanou analogovým výstupem ve formě napětí do měřicí karty NI - USB 6008. Karta byla připojena do počítače přes USB kabel, který zajišťoval jejich spolehlivou komunikaci a přenos dat.

Všechny kladené požadavky na virtuální měřicí pracoviště, jejich rozbor a reálné řešení jsou popsány v podkapitole 6.4. Výsledky z měření a podrobný popis měření se nachází v podkapitole 6.5. Veškeré používané součásti pro měření, jako byla měřicí karta NI – USB 6008, Teslametr F.W. Bell 5180 a vývojové prostředí LabVIEWTM, jsou podrobněji popsány níže.

6.1 Programové prostředí LabVIEW™

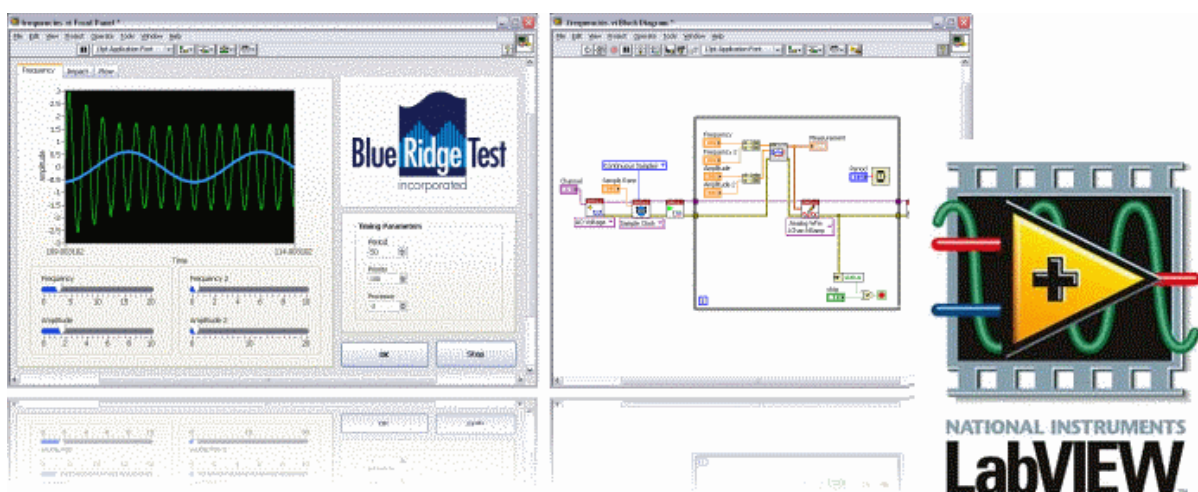
LabVIEW je zkratka pro **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench. Tento systém je velice vhodný pro programování komunikace osobního počítače s různými periferními zařízeními, které jsou k němu připojeny. Obzvláště pak měřicí přístroje.

Programování se neprovádí obvyklými metodami psaní programu ve formě textu, jako například jazyk C, Pascal, ale program se kreslí pomocí programovacího jazyka G. Což značí grafický programovací jazyk. Ve své podstatě se jedná o programování na principu datového toku, procházejícího skrz uzly v blokovém diagramu, určujícím posloupnost prováděných funkcí. Tyto programy v jazyce G se kompilují a produkují samostatné spustitelné programy.

Tento program byl vyvinut pro vědce a techniky, aby zde mohli bez větších znalostí programování realizovat a vizualizovat své myšlenky. Při tvorbě programu vytvářejí svůj vlastní čelní panel, na kterém umisťují virtuální přístroje, různé ovládací prvky, signalizační prvky, užitečné informace a také zde provádějí mnoho operací. Zároveň je jim zabráněno nastavovat nedovolené hodnoty, které by mohly poškodit připojená zařízení nebo by vedly k nesprávnému výpočtu či dalším chybám.

Hlavní část programování je skryta v blokovém diagramu, kde se provádí samotné grafické programování. Nachází se zde mnoho různých prvků a každý má svou vlastní funkci. Hlavní úkol spočívá ve správném využívání těchto prvků, aby co nejefektivnějším a nejpresnějším způsobem byl vyřešen daný úkol. Objevují se zde výběry struktur, které je možno využívat. Matematické funkce, logické funkce, nástroje pro práci s polem hodnot, nástroje pro práci s clustery, konfigurační nastavení pro připojení měřicích karet.

Největší výhodou oproti normálním měřicím přístrojům je možnost doplnění nebo upřesnění funkce virtuálního přístroje softwarově vhodnou úpravou blokového diagramu bez větších nákladů. Další nespornou výhodou je možnost vytvoření si vlastního přístroje, funkce nebo algoritmu, který měří, řídí nebo vyhodnocuje naprogramované procesy. [12]



obr. 6.1.1 - Ukázka čelního panelu a blokového diagramu

6.2 NI – USB 6008

Multifunkční karta NI – USB 6008 je jedna z nejmenších a nejlevnějších profesionálních DAQ zařízení od firmy National Instruments pro použití ve vývojovém prostředí LabVIEW™. Základní výbavou karty je 8 analogových vstupů, 2 analogové výstupy a jeden 32bitový čítač. Karta se propojuje s počítačem pomocí USB rozhraní. Maximální svorkové napětí přivedené na analogový vstup je omezeno na ± 10 V. [18]

tab. 6.2.1- Specifikace NI – USB 6008

NI- USB 6008	
Vstupy / výstupy	8 / 2
Rozlišení	12 bitů
Max. vzorkovací kmitočet	10 kS/s



obr. 6.2.1 - Karta NI – USB 6008 [18]

6.3 Teslametr F.W. Bell 5180

Základní funkcí tohoto měřicího přístroje je měření velikosti magnetické indukce ve volném prostředí. Přístroj je vhodný pro měření jak v laboratoři, tak i v terénu. Je určen pro měření stejnosměrných i střídavých magnetických polí v širokém rozpětí frekvence i magnetické indukce. Zde však záleží na typu použité Hallovy sondy. [16]

tab. 6.3.1 - Specifikace Teslametru F.W. Bell 5180 [16]

Nastavitelné rozsahy měření		
	Rozsah	Rozlišení
Ultra low range	100 mT	0,1 mT
Low range	30 mT	10 mT
Midle range	300 mT	100 mT
High range	3 T	1 mT
Rychlost měření – zobrazování		
Display	4 S/s	
Analogový výstup	100 kS/s	
USB port	1 S/s	



obr. 6.3.1 - Teslametr FW Bell 5180 [19]

tab. 6.3.2 - Typ a specifikace použité Hallovy sondy [20]

Typ sondy	Frekvenční rozsah	Základní citlivost	Linearita	Měřicí rozsah
 Axial Probe	DC – 20 kHz	1x	0,5% do 3 T	30 mT – 3 T

6.4 Virtuální měřicí pracoviště

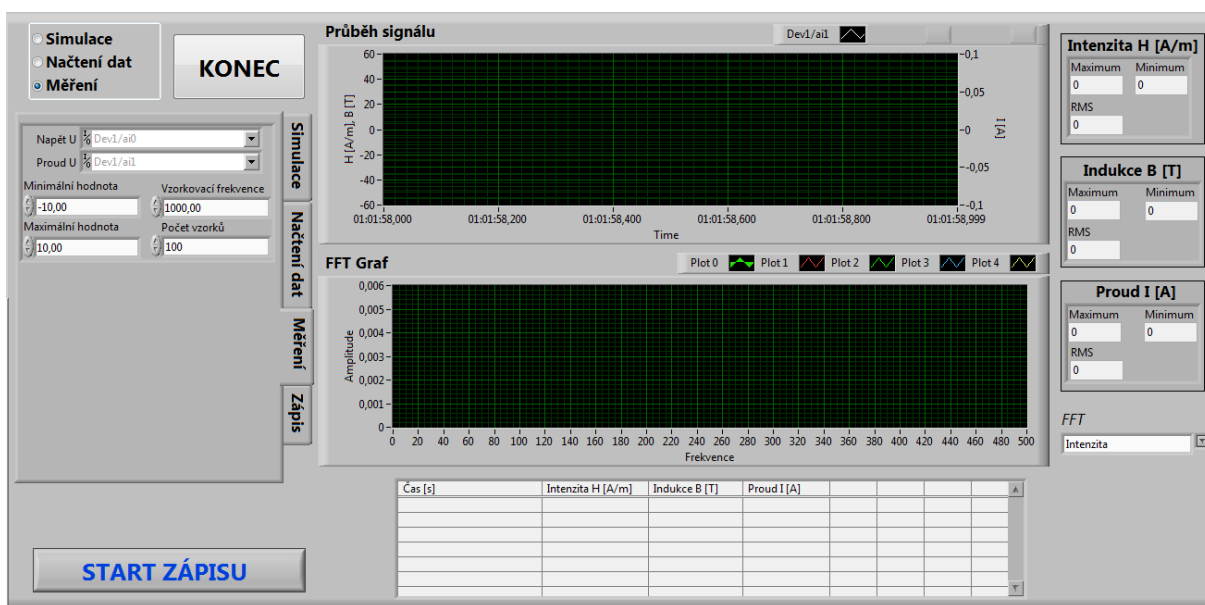
Prvním úkolem praktické části této diplomové práce bylo zpracování programu ve vývojovém prostředí LabVIEWTM pro měření magnetických polí s využitím prostředků popsaných v předchozích podkapitolách 6.1 až 6.3.

Virtuální měřicí pracoviště je zkonstruováno podle požadavků vedoucího práce tak, aby bylo dosaženo obecného pojetí dané problematiky, a aby tento program mohl být využíván při pozdějším měření. Hlavními cílem virtuálního měřicího pracoviště je provádění měření s vykreslením do grafů a následným zapsáním hodnot do textového souboru pro pozdější použití, například v tabulkovém editoru Microsoft Office Excel.

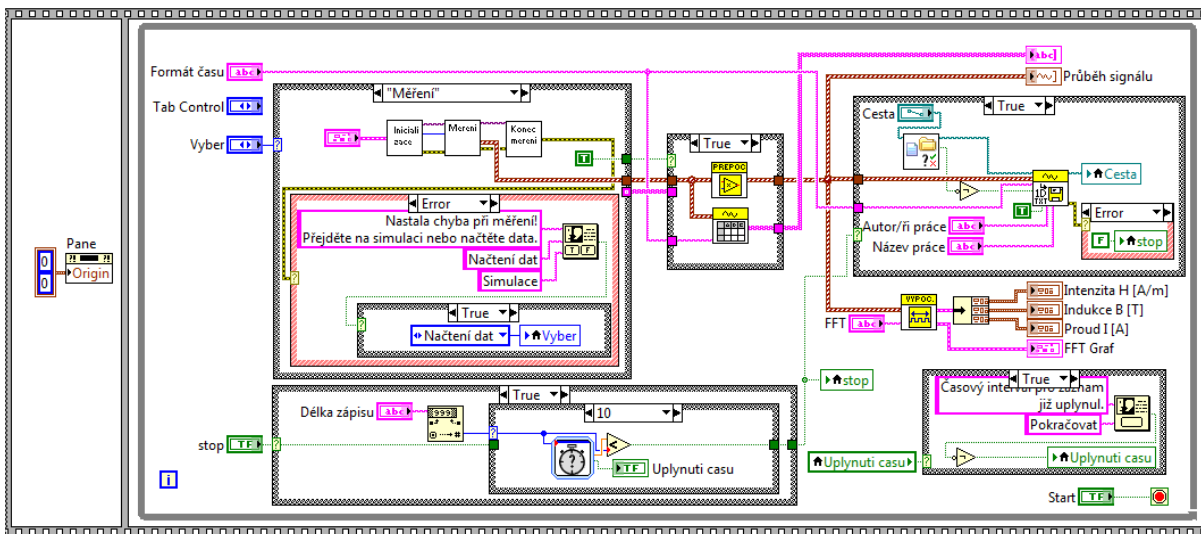
Na *obr. 6.4.1* je zobrazen čelní panel celého virtuálního měřicího pracoviště. V levé horní části se nachází výběr režimu programu. Dále je zde tlačítko pro ukončení celého programu. Pod těmito základními prvky se nachází tabulka s upřesňujícím nastavením. Jednotlivé karty obsahují nastavení pro jednotlivé režimy programu. Jako například vzorkovací frekvence, výběr daného kanálu, výběr cesty pro zápis, výběr délky zápisu při automatickém měření atd. V centrální části čelního panelu se zobrazuje graf průběhu signálů, graf FFT a tabulka hodnot, které jsou připraveny k zápisu do souboru. V pravé části jsou umístěny indikátory maximálních, minimálních a efektivních hodnot jednotlivých signálů a také výběr signálu pro vykreslení do grafu FFT. V levé dolní části se nachází tlačítko pro začátek a konec zápisu do souboru.

O funkčnost celého celku se stará tzv. blokové schéma, ve kterém jsou vzájemně propojeny funkční bloky tak, aby zajišťovaly jeho správný chod. Jednotlivé funkční bloky a jejich funkce budou popsány v pozdějších kapitolách.

Všechna nastavení programu jsou softwarově chráněna proti zadávání nežádoucích hodnot, které by mohly poškodit, případně narušit průběh měření nebo výpočtu.



obr. 6.4.1 - Čelní panel programu



obr. 6.4.2 - Blokový diagram programu

Na **obr. 6.4.2** je zobrazen blokový diagram celého programu. Jak již bylo popsáno v podkapitole **6.1**, jedná se o grafické programování v jazyce G, kterého se dosáhne správným propojením jednotlivých funkčních bloků v diagramu.

Hlavní část programu je ve smyčce WHILE LOOP, aby celý program probíhal stále znovu, dokud nebude zastaven uživatelem přes tlačítko START/STOP. Pokud by program nebyl umístěn v této struktuře, došlo by pouze k jednomu opakování programu a poté by se sám zastavil. Dále se zde objevují jednotlivé CASE struktury, jejichž funkce je stejná jako funkce If v normálním programování. Na základě vstupní podmínky vyhodnocuje TRUE nebo FALSE a spustí část programu, která je uložena v dané oblasti.

Instrukce v programu probíhají zleva do prava, přičemž dochází k vyhodnocování podmínek a postupnému vnořování do CASE struktur a vykonávání funkčních bloků v nich uložených. Mnohé funkční bloky jsou již implementovány do základního výběru při programování, avšak ne vždy jsou schopny plnit přesné požadavky pro konkrétní aplikaci. Z tohoto důvodu se využívají tzv. subVI. Ve své podstatě se jedná o podprogramy, složené ze základních bloků tak, aby vykonávaly danou funkci nebo ochranu. Využívají se také z důvodu zpřehlednění a lepší čitelnosti samotného kódu.

Chyby, které se objeví například při měření nebo nesprávném nastavení, jsou hlášeny z funkčních bloků a o jejich zobrazení se stará CASE struktura, která je v blokovém diagramu orámována červenou barvou. Do této struktury je možno umístit například systémový dialog, který danou situaci nahlásí na čelním panelu uživateli a ten pak vybere vhodný typ reakce. Nebo zde může být použit určitý druh automatické opravy dané situace.

Data se mezi funkčními bloky mohou předávat v různých tvarech, například ve formě textu, čísla, binárního kódu, clusteru nebo pole dat. Daný funkční blok však musí umět s těmito daty pracovat. Pokud máme data ve špatném formátu, který nevyhovuje danému bloku, je nutno tato data převést do správného tvaru, aby byla zajištěna funkčnost. O nemožnosti práce s daty ve špatném formátu nás informuje ERROR LIST, ve kterém najdeme přesné znění dané chyby, umístění v blokovém diagramu a nápovědu pro možnost její nápravy.

Režimy provozování programu

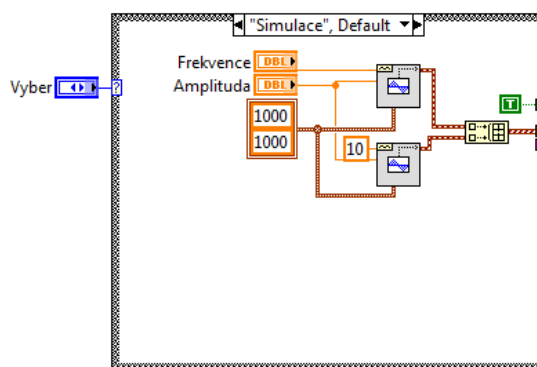
Virtuální měřicí pracoviště je možné provozovat ve třech základních režimech. Režim simulace, režim načtení dat a režim měření. Tyto režimy slouží pro získání vstupních hodnot, které jsou dále zpracovávány, přepočítávány a vykreslovány do grafů a tabulek.

Režim simulace

Pokud je na čelním panelu vybrán režim simulace, dochází podle **obr. 6.4.3** k přepnutí CASE struktury na SIMULACE. Zde jsou generovány dva signály trojúhelníkového průběhu s určitou frekvencí a amplitudou, kdy tyto hodnoty jsou přebírány z čelního panelu podle nastavení uživatele. Oranžová čísla 1000 a 1000 znamenají vzorkovací rychlost a počet vzorků za sekundu.

Pole hodnot, vycházející z generátorů signálu jsou spojeny do jednoho pole o dvou sloupcích a pokračují ze struktury SIMULACE k dalšímu zpracování v programu.

Režim simulace slouží pouze pro ověření správné funkčnosti programu. Jedná se o pomůcku pro programátora, aby si mohl ověřit všechny dostupné stavy daného programu pro správné nastavení ochran a hlášení chyb, které se mohou objevit při reálném měření.



obr. 6.4.3 - Režim simulace

Režim načtení dat

Po přepnutí přepínače na čelním panelu do polohy „Načtení dat“ je opět vybrána odpovídající CASE struktura. Využití tohoto režimu je z důvodu zpětné analýzy již změřených hodnot. Do subVI, jak je patrné z **obr. 6.4.4**, vstupuje vybraná cesta k umístění daného souboru. Tato cesta je zkontrolována, zda není prázdná, aby nedošlo k chybě, která by mohla zastavit celý proces. Pokud cesta není prázdná a soubor existuje, začíná otevírání souboru a jeho následné přečtení.

Hlavička, umístěna na začátku souboru je přeskočena a jsou vybrána pouze data jednotlivých křivek. Ta jsou převedena z textových hodnot, ve kterých jsou uložena na čísla. V souboru jsou taktéž vybrány počáteční časy t_0 pro každou křivku a časové zpoždění mezi jednotlivými hodnotami dt . Následně je zkonstruována replika původního uloženého signálu a poslána k dalšímu zpracování v programu.



obr. 6.4.4 - Ikona režimu načtení dat

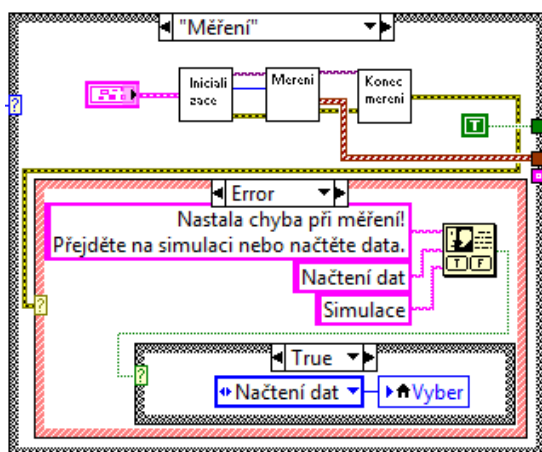
Na výstup je taktéž posláno textové pole hodnot pro zobrazení v tabulce hodnot na čelním panelu a výstupní cesta.

Režim měření

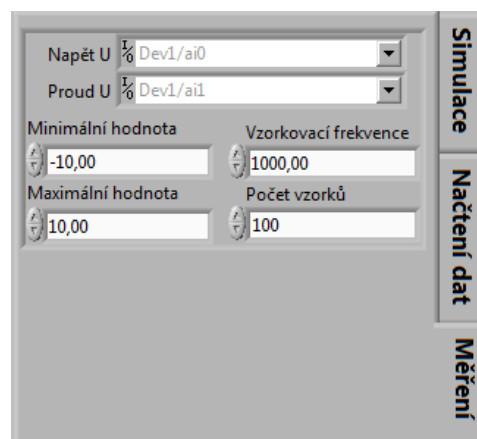
Jedná se o nejdůležitější režim celého programu. Na čelním panelu (**obr. 6.4.6**) provádíme inicializaci připojené měřicí karty NI-USB 6008. Vybereme kanály, na kterých budeme měření provádět, minimální a maximální snímané hodnoty, vzorkovací frekvenci, kterou budeme vzorky snímat, a počet vzorků, které z dané karty chceme přechíst za sekundu. Po tomto nastavení subVI Inicializace pošle do subVI Měření výstupní task, ve kterém jsou obsaženy všechny tyto základní informace a subVI Měření se spojí s měřicí kartou, která začne posílat měřené hodnoty do počítače. Tyto hodnoty jsou zpracovány a vystupují ze subVI Měření k úpravě v programu.

Pokud není připojena měřicí karta, je tato skutečnost rozpoznána a vyhodnocena jako chyba. Při této chybě se uživateli objeví na čelním panelu dialogové okno, které ho na to upozorní, a uživatel má na výběr mezi režimy simulace nebo načtení dat, do kterých ho program přepne. Toto přepnutí je zajištěno přes nahrání hodnoty do lokální proměnné výběrového tlačítka z čelního panelu.

Při zastavení měření musí dojít ještě k ukončení měřicího procesu a odpojení karty. O to se stará subVI Konec měření.



obr. 6.4.6 - Funkce měření v blokovém diagramu



obr. 6.4.5 - Karta měření na čelním panelu

Další součásti programu

V této podkapitole popíši hlavní funkce celého programu a vysvětlím zde logické souvislosti a návaznosti jednotlivých struktur a použití funkčních bloků. Dále také jejich podrobné funkce a význam v programu.

Dalšími součástmi programu se rozumí zpracování vstupních signálů z některého režimu. S daty z jednotlivých režimů jsou prováděny automatické operace, usnadňující uživateli práci s nimi. Data se přepočítávají, zaznamenávají do tabulky, provádí se s nimi výpočtové operace pro zjištění maximálních, minimálních a efektivních hodnot a případně zaznamenávají do textového souboru.

Celý program je velice variabilní a je zde možnost jej doplnit případně upravit jeho funkci podle představ uživatele. Tato variabilita se taktéž vztahuje i na vzhledové zpracování celého programu a úpravy pro lepší orientaci v daném prostředí. Jak již bylo popsáno v kapitole 6.1 je to jedna z největších výhod programování v LabVIEWTM.

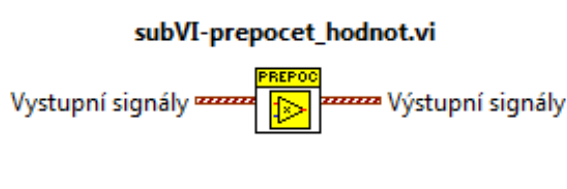
Přepočet hodnot

Toto subVI pracuje na principu vynásobení nebo vydělení vstupních signálů. Výstupní napětí z Teslametru F.W. Bell 5180 musíme vynásobit koeficienty zjištěnými z uživatelského manuálu, jelikož Teslametr posílá na měřicí kartu pouze napětí a ne intenzitu a indukci, jak bychom potřebovali. Po vynásobení těmito koeficienty dostaneme velikost intenzity a indukce. Tyto hodnoty následně vystupují ze subVI a celý program s nimi posléze pracuje.

Měřicí karta NI – USB 6008 umí měřit pouze napětí. Ke zjištění hodnoty proudu protékajícího cívkou, je nutné využít

Ohmova zákona $I = \frac{U}{R} [A]$ a změřené

napětí vydělit hodnotou odporu, na kterém bylo napětí měřeno. Výsledkem je proud protékající cívkou. Takto získané hodnoty je možno využívat v programu.

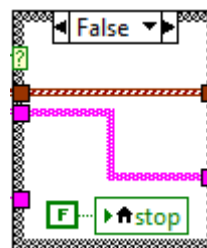


obr. 6.4.7 - Ikona subVI přepočet hodnot

Zápis do tabulky

Aby bylo možno zapisovat měřené nebo simulované hodnoty do tabulky, je nutné je převést z waveform dat na data typu string – text. Toto vše vykonává subVI-uložení_do_tabulky. Pole dat je měření procházeno jedno po druhém a převáděno na text, který je potom posílán ve výstupním textovém poli.

Do subVI je zakomponována možnost nastavení číselného formátu prvního časového sloupce. Na výběr je z formátu číselného, minuty:sekundy nebo normální celé datum. Uživatel má toto nastavení přístupné na čelním panelu v kartě Zápis, kde vybere požadovaný formát.

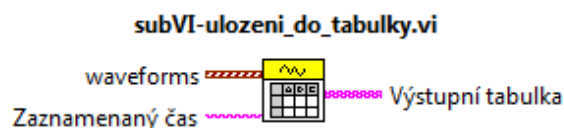


obr. 6.4.9 -
Podmínka FALSE



obr. 6.4.8 -
Podmínka TRUE

Aby se do programu nezanášely chyby, způsobené přepočtem zpětně načtených dat, byly předchozí subVI zařazeny do stejné CASE struktury, která je ovládána pomocí konstant umístěných ve výběru režimu provozování programu. Pro režim měření a simulace je konstanta TRUE (obr. 6.4.9). Kdy program vykonává přepočet hodnot a provádí přípravu pro zápis do tabulky.



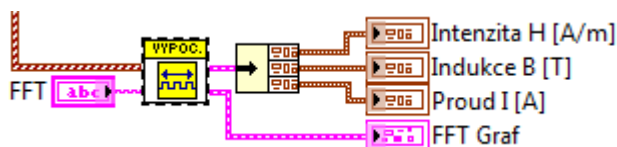
obr. 6.4.10 - Ikona subVI zápisu do tabulky

Pro režim načtení dat je posílána konstanta FALSE (obr. 6.4.10). Ve FALSE struktuře je doplněna lokální proměnná a tlačítka Start a Stop zápisu z čelního panelu. Do této proměnné je permanentně nahrána konstanta FALSE, aby nebylo možné zapisovat načtené hodnoty zpět do souboru. Taktéž je v této struktuře přeskočena úprava hodnot pro zápis do tabulky, jelikož tyto hodnoty jsou načteny rovnou ze souboru v textovém tvaru a proto není potřeba je dále upravovat.

Výpočty hodnot a Fast Fourierova Transformace

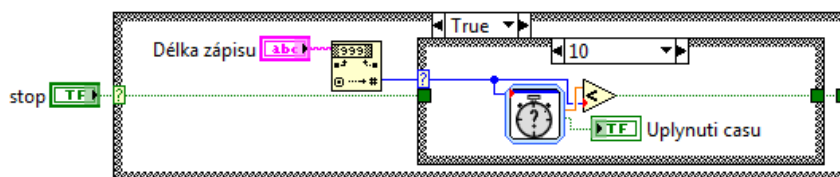
Výpočet hodnot slouží pro zjištění minimálních, maximálních a efektivních hodnot jednotlivých průběhů. Do subVI vstupují všechny průběhy v jednom poli o čtyřech sloupcích. První sloupec je časový a další tři obsahují přepočtená data průběhů z měření, simulace nebo rovnou data načtená. Poté je toto pole rozděleno na jednotlivé průběhy a jsou vypočítány jejich maximální, minimální a efektivní hodnoty. Výsledky výpočtů jsou odeslány v jednom clusteru ven ze subVI a vyobrazeny na čelním panelu v pravé části obrazovky. Na **obr. 6.4.11** je výřez ze zapojení v hlavním programu.

Aby FFT spektrum bylo přehlednější a lépe se v grafu orientovalo, je zaveden výběr jednotlivých křivek. Výpočet zajišťuje jedna ze základních funkcí pro měření v LabVIEW™ a to funkce FFT spectrum, která po připojení výstupu na graf zobrazí celé spektrum frekvencí a jejich amplitud obsažených v průběhu.



obr. 6.4.11 - Výřez subVI v blokového diagramu

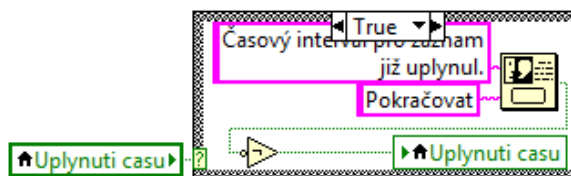
Časovač zápisu



obr. 6.4.12 - Blokový diagram časovače zápisu

Tato procedura slouží pro určení délky zápisu dat do zadaného souboru. Na výběr je vlastní délka, 10 sekund, 30 sekund nebo 1 minuta. Po spuštění zápisu program zjistí, jaká časová konstanta je nastavena. Tu převede z textového formátu na číslo a podle něj vybere odpovídající část CASE struktury. Poté se stejná časová konstanta nahraje do čítače sekund. Ten začne počítat od nuly do zadaného čísla a podmínka za čítačem ověřuje, jestli uplynulý čas z čítače již nepřekročil danou konstantu. Pokud ji ještě nepřekročil, posílá na výstup hodnotu TRUE.

Po překročení dané hodnoty je proměnná Uplynutí času přepnuta na hodnotu TRUE a zároveň na výstupu porovnávací podmínky bude hodnota FALSE a zápis je přerušen. Hodnota proměnné Uplynutí času ovládá přes lokální proměnnou strukturu CASE, která vypíše systémový dialog o ukončení zápisu do daného souboru (**obr. 6.4.13**).



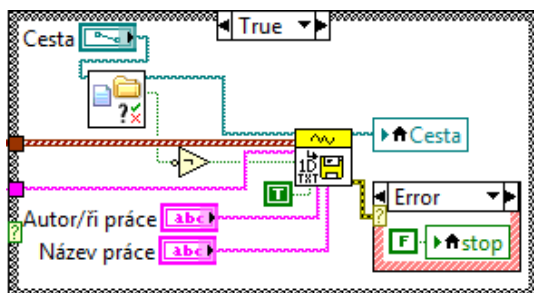
obr. 6.4.13 - Systémový dialog po uplynutí času

Zápis do souboru

Velice důležitou částí celého programu je zápis naměřených dat do textového souboru. Při stisknutí tlačítka pro start zápisu na čelním panelu vyšle hodnotu TRUE a v CASE struktuře nastane spuštění procedury pro zápis. Délka zápisu do souboru je řízena již zmíněným časovačem zápisu. Zapisovaný formát času do souboru je možné upravit z výběrové nabídky. Buď je možné použít číslování, minuty:sekundy anebo celé datum. Pokud při zápisu nastane chyba, je zápis do souboru zastaven, aby nedošlo k poškození ukládaných dat.

Nejdříve program zkontroluje, zda byla vybrána cesta k souboru. Pokud ne, start zápisu je zastaven a uživatel je vyzván k výběru souboru. Pokud soubor byl vybrán, je v daném umístění vytvořen a hodnoty se do něj začnou zapisovat. Při prvním vytvoření souboru je do něj zapsána hlavička obsahující základní informace o měření. Jako název měření, autoři práce, počáteční čas měření t_0 pro každou křivku, časové zpoždění mezi jednotlivými hodnotami Δt a řádek popisu jednotlivých sloupců.

Celý tento soubor hodnot je možno exportovat do tabulkového editoru a provádět s ním další potřebné výpočty nebo jej zpětně nahrát do programu.



obr. 6.4.15 - SubVI zápisu do souboru

obr. 6.4.14 - Čelní panel zápisu do souboru

Název práce Měření typového elektromagnetického jha - velká cívka - sonda na konc
 Autor/ři práce Varmuža Petr

Křivka	[0]	[1]	[2]
t0	19.04.2012 16:26:47,267	19.04.2012 16:26:47,267	19.04.2012 16:26:47,267
delta t	0,200000	0,200000	0,200000

Čas (s)	H(kA/m)	B(mT)	I(A)
19.04.2012 16:26:47,267	9,170E-2	1,152E-1	9,413E-4
19.04.2012 16:26:47,467	9,170E-2	1,152E-1	9,413E-4
19.04.2012 16:26:47,667	9,170E-2	1,152E-1	9,413E-4
19.04.2012 16:26:47,867	-3,135E-1	-3,939E-1	9,413E-4
19.04.2012 16:26:48,067	9,170E-2	1,152E-1	9,413E-4
19.04.2012 16:26:48,201	-3,135E-1	-3,939E-1	9,413E-4
19.04.2012 16:26:48,401	9,170E-2	1,152E-1	9,413E-4
19.04.2012 16:26:48,601	-3,135E-1	-3,939E-1	9,413E-4
19.04.2012 16:26:48,801	9,020E-1	1,134E+0	1,180E-1
19.04.2012 16:26:49,001	2,523E+0	3,170E+0	2,555E-1
19.04.2012 16:26:49,040	2,523E+0	3,170E+0	2,860E-1
19.04.2012 16:26:49,240	2,523E+0	3,170E+0	3,929E-1
19.04.2012 16:26:49,440	4,954E+0	6,225E+0	5,304E-1
19.04.2012 16:26:49,640	6,574E+0	8,262E+0	7,543E-1

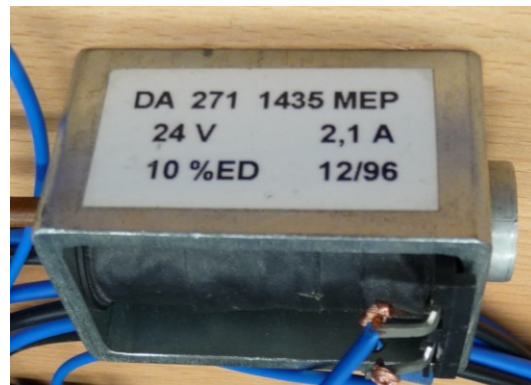
obr. 6.4.16 - Ukázka uloženého souboru

6.5 Měření elektromagnetického jha

Druhým úkolem praktické části diplomové práce bylo provedení měření na dvou kusech typového elektromagnetického jha elektromagnetů od firmy MEP, s využitím vytvořeného programu popsaneho v předchozí kapitole.

tab. 6.5.1 - Základní vlastnosti elektromagnetu MEP DA271

Elektromagnet MEP DA271	
Jmenovité napětí	DC 24 V
Jmenovitý proud	2,1 A
Rozměry (V x Š x H)	40 x 60 x 32 mm
Výrobce	MEP Postřelmov a.s.



obr. 6.5.1 - Elektromagnet MEP DA271

tab. 6.5.2 - Základní vlastnosti elektromagnetu MEP 058

Elektromagnet MEP 058	
Jmenovité napětí	DC 24 V
Jmenovitý proud	5,1 A
Rozměry (V x Š x H)	48 x 75 x 60 mm
Výrobce	MEP Postřelmov a.s.



obr. 6.5.2 – Elektromagnet MEP 058

Program musel být nejdříve nakonfigurován pro zobrazování měřených údajů ve správném tvaru. Jelikož z Teslametru F.W. Bell 5180 bylo do měřicí karty NI – USB 6008 posíláno napětí od 0 V do 3 V. Toto napětí odpovídalo měřeným hodnotám magnetické indukce **B**. Přijímané napětí je vynásobeno konstantou 100, aby byla magnetická indukce **B** v programu zobrazována v mT. Posléze byl nastaven přepočít mezi indukci a intenzitou magnetického pole (6.5.1 a 6.5.2), který odpovídá jejich vzájemné lineární závislosti a výsledek je podělen hodnotou 1000, abychom měli intenzitu magnetického pole **H** v kA/m.

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \Rightarrow H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} [\text{A/m}] \quad (6.5.1)$$

$$H = \frac{B}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \quad (6.5.2)$$

Další částí přepočtu byl měřený proud. Jelikož měřicí karta není schopna měřit samostatně proud, bylo využito odporového můstku o velikosti $1\ \Omega$, s jehož pomocí měřené napětí odpovídalo proudu tekoucímu měřenou cívkou.

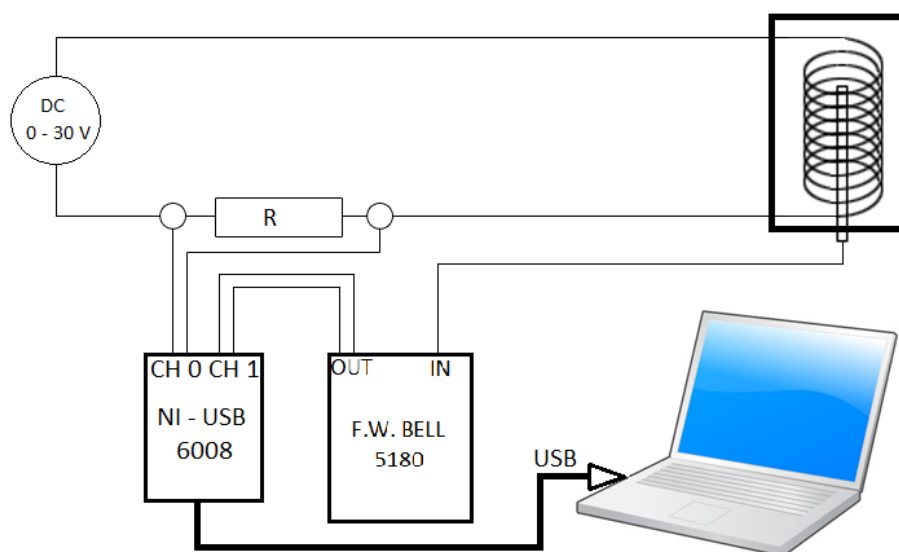
V průběhu měření byl využíván SS zdroj napětí, pomocí něhož docházelo k regulaci vstupního napětí, respektive proudu tekoucího cívkou elektromagnetu. Napětí bylo regulováno od 0 V do 30 V a zpět na 0 V. Při zvyšování napětí docházelo v elektromagnetech k magnetizaci a následným snižováním napětí docházelo k demagnetizaci.

U každého elektromagnetického typového jha byla provedena tři měření. Sonda byla umístěna na začátku cívky, uprostřed cívky a na konci cívky.

Použité přístroje a součásti:

- SS zdroj napětí DIAMETRAL 130R50D – stejnosměrný regulovatelný zdroj s plynulou regulací napětí v rozsahu $0 \div 30\text{ V}$ s omezením výstupního proudu od $0,1 \div 10\text{ A}$.
- Odporový můstek $1\ \Omega$ – sloužící pro převod proudu na napětí snímané měřicí kartou
- Teslametr F.W. Bell 5180 – popis přístroje uveden v podkapitole 6.3
- Axiální měřicí sonda – popis sondy v podkapitole 6.3
- Měřicí karta NI – USB 6008 – popis karty uveden v podkapitole 6.2
- PC s program virtuálního měřicího pracoviště – podrobný popis funkce v podkapitole 6.4
- SS elektromagnet firmy MEP DA271
- SS elektromagnet firmy MEP 058

Schéma zapojení:



obr. 6.5.3 - Schéma zapojení měření

Postup měření:

Po zapojení všech přístrojů podle schémat zapojení a spuštění virtuálního měřicího pracoviště na počítači, lze zapnout zdroj stejnosměrného napětí. V prvním kroku se zasune axiální měřicí sonda do měřené cívky pouze na začátek. V počítači se vybere cesta k souboru, do kterého budou zapisována měřená data a spustí se start zápisu. V tuto chvíli se již do souboru zapisují snímané hodnoty z měřicí karty.

Napětí v obvodu, respektive proud, je plynule regulován od 0 V do 30 V. Po dosažení 30 V plynulou regulací, pokles opět na 0 V. Po dokončení jednoho cyklu se vypne v programu zápis do souboru.

Po ukončení jednoho měření se celý tento cyklus opakuje, ovšem s tou výjimkou, že měřicí sonda je zasunuta hlouběji do měřené cívky. Nejlépe doprostřed a posléze na konec cívky, aby bylo později v grafech vidět, jak silné je v těchto oblastech magnetické pole, a bylo možné vyhodnotit, ve které oblasti je nejsilnější. Do grafu se taktéž zanesou závislost magnetické indukce na proudu protékajícím cívkou a to v obou směrech, aby bylo možné sledovat průběh magnetizační a demagnetizační křivky.

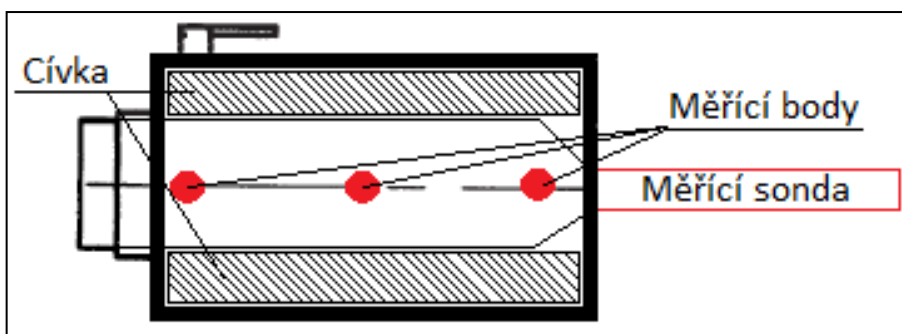
Výsledky měření:

1) Měření elektromagnetického jha MEP DA271

Při měření elektromagnetu MEP DA271 byla z elektromagnetu demontována středová kotva zajišťující svým přitahem zdvih elektromagnetu a místo ní byla dovnitř zasunuta axiální měřicí sonda Teslametru pro sběr údajů o magnetické indukci na třech místech měření. Na **obr. 6.5.4** jsou tyto body vyznačeny červenou tečkou. Začátek, střed a konec cívky, kdy začátek je u axiální měřicí sondy. U každého z těchto měření byly zaznamenány data do textového souboru a zpracovány tabulkovým editorem Microsoft Office Excel.

Z naměřených dat jsem zpracoval grafy závislosti magnetické indukce **B** na proudu protékajícím cívkou **I**. Vstupní stejnosměrné napětí napájející obvod bylo regulováno od 0 V do 30 V, respektive proud protékající cívkou, byl regulován a zaznamenáván do textového souboru. Při nárůstu proudu docházelo ve všech případech k magnetizaci elektromagnetického jha elektromagnetu. Křivka magnetizace je v grafech označena modrou barvou.

V případě snižování napětí z 30 V na 0 V, respektive poklesu proudu v cívce, docházelo k demagnetizaci, která je označena v grafech barvou červenou.



obr. 6.5.4 - Umístění sondy při měření ve vzduchové mezeře elektromagnetu

tab. 6.5.3 – Výsledky praktického měření na MEP DA271

Vzdálenost od okraje cívky [mm]	I [A]	B [mT]	H [kA/m]	Graf
10 mm	2,047	13,35	10,63	graf 6.5.2
30 mm	2,078	72,92	58,03	graf 6.5.3
50 mm	2,154	9,789	7,79	graf 6.5.4

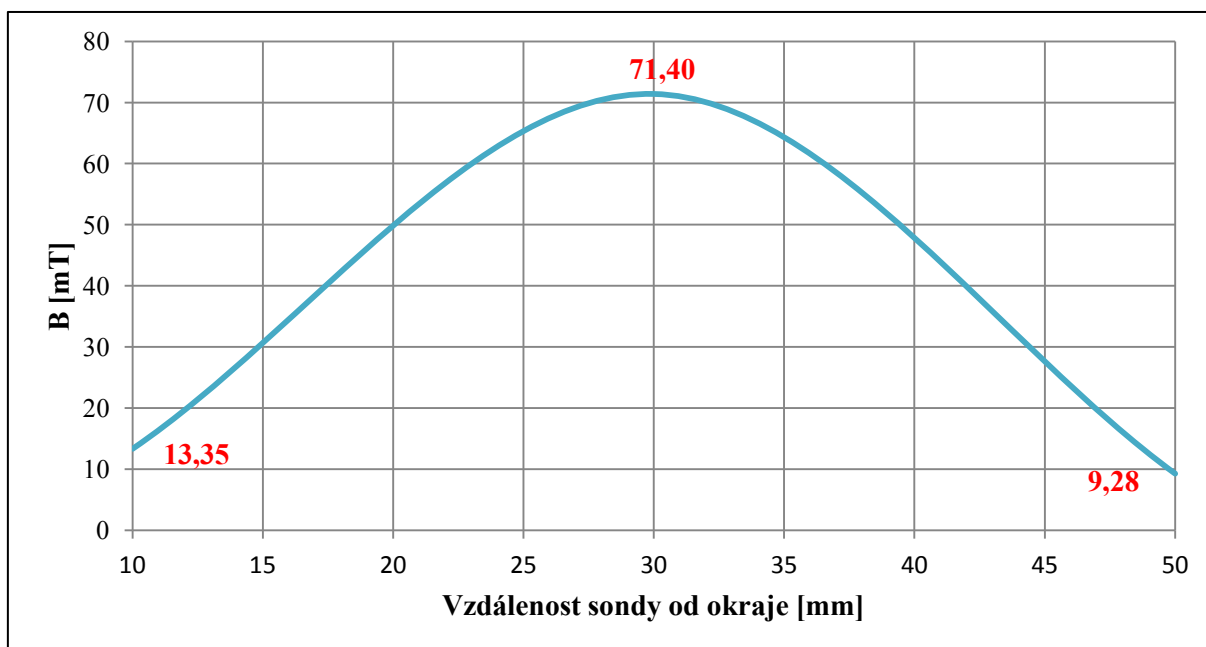
Předchozí tabulka ukazuje maximální hodnoty naměřené při různých vzdálenostech zasunutí měřicí sondy do vzduchové mezery elektromagnetu. Hodnoty z jednotlivých měření a časové záznamy zpracované programem jsou přiloženy do příloh diplomové práce.

Ve všech **grafech 6.5.2 – 6.5.4** je vidět lineární závislost magnetické indukce na proudu protékajícím cívku. Na začátku a na konci cívky dochází ke skokům magnetické indukce, jelikož v těchto místech je mnohem vyšší výskyt rozptylových toků. Uprostřed vzduchové mezery cívky elektromagnetu (**graf 6.5.3**) je charakteristika magnetizační i demagnetizační čistě lineární. Pole je zde homogenní a bez výrazných změn.

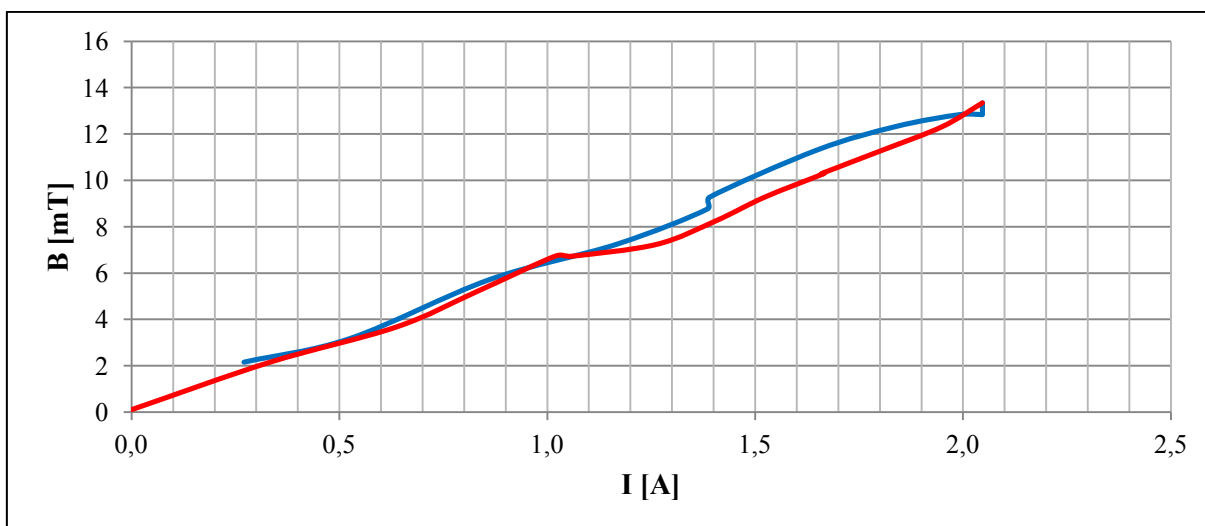
V **grafu 6.5.1** je křivka rozložení magnetické indukce po délce vzduchové mezery v cívce. Lze vidět maximální magnetickou indukci uprostřed cívky, která směrem k okrajům cívky slábne. Pro tento graf byl vybrán z každého měření proud, který se nejvíce podobal proudu z ostatních měření a vybrána indukce při těchto proudech.

tab. 6.5.4 – Tabulka hodnot pro rozložení magnetické indukce na délce cívky

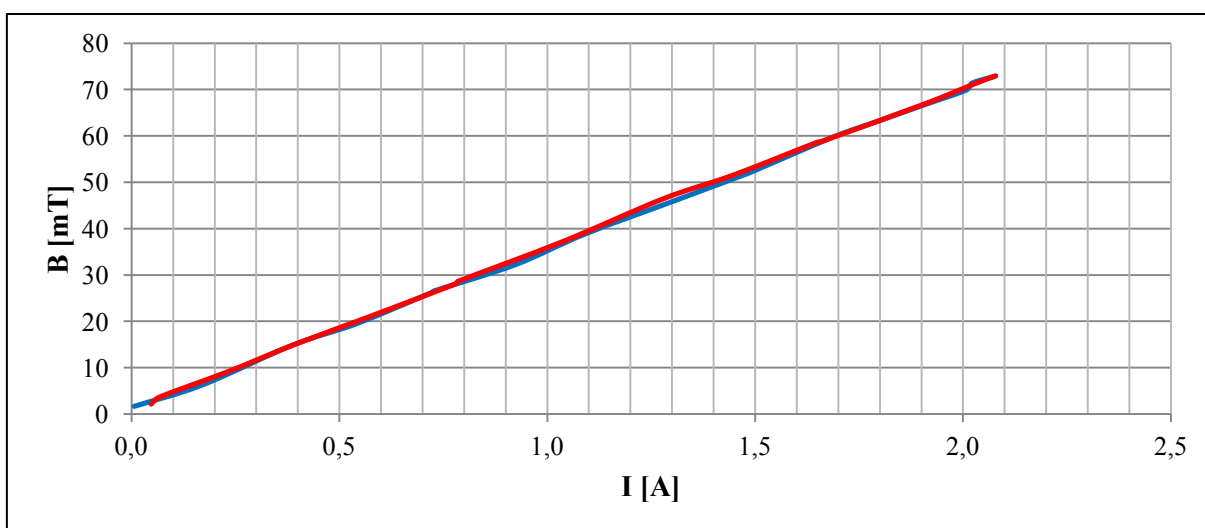
	Začátek cívky	Střed cívky	Konec cívky
B [mT]	13,35	71,40	9,280
I [A]	2,047	2,032	2,042



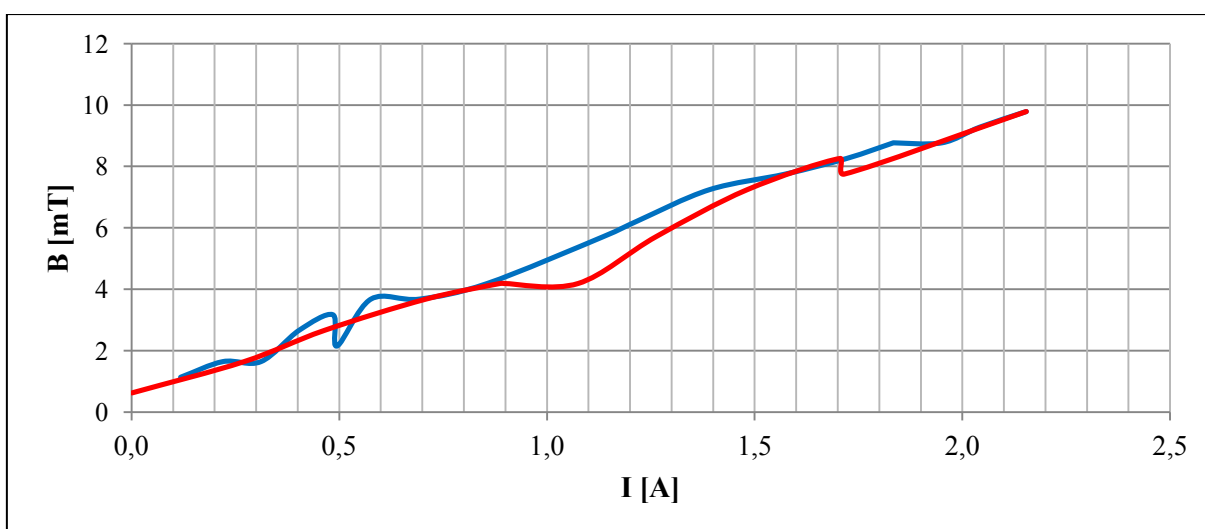
graf 6.5.1 - Graf rozložení magnetické indukce na délce cívky



graf 6.5.2 - Graf $B = f(I)$ (MEP DA271 - začátek cívky)



graf 6.5.3 - Graf $B = f(I)$ (MEP DA271 - uprostřed cívky)



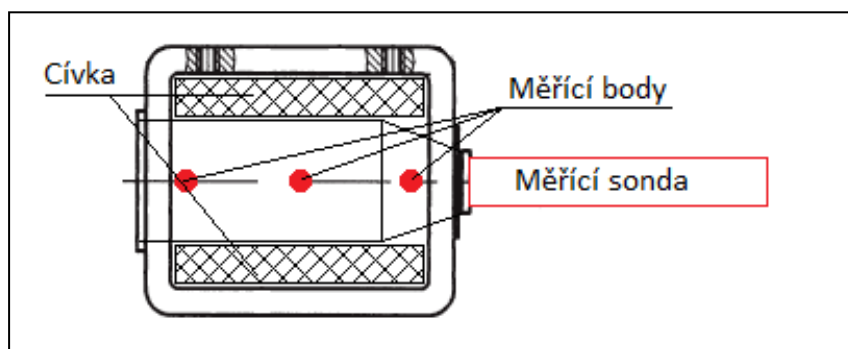
graf 6.5.4 - Graf $B = f(I)$ (MEP DA271 - konec cívky)

2) Měření elektromagnetického jha MEP 058

Druhým měřením bylo měření na elektromagnetu od firmy MEP, dnes již spojené se Slováckými strojírnami Uherský Brod. Jednalo se o typ MEP 058. Tento elektromagnet je o něco větší než v předchozím případě a disponuje mnohem vyšším jmenovitým tahem působícím na kotvu. I zde byla místo vyšroubované kotvy zasunuta axiální měřicí sonda. Hloubku zasunutí sondy byla měněna z polohy na začátku přes střed až na konec vzduchové mezery elektromagnetu.

Data z měření byla zpracována stejným způsobem, avšak s tím rozdílem, že byla použita vyšší vzorkovací frekvence, která způsobovala $dt = 0,2$ S/S, což je časové zpoždění mezi jednotlivými hodnotami, neboli vzorky, za sekundu. V prvním měření bylo $dt = 1$ S/S, čili jeden vzorek za sekundu.

Naměřená data byla vynesena do grafických závislostí magnetické indukce **B** na proudu protékajícím cívkou **I**. Regulace napětí probíhala opět od 0 V do 30 V, kdy v tomto případě docházelo k magnetizaci, křivka označena modrou barvou v grafech, a v opačném případě při snižování napětí docházelo k demagnetizaci, křivka označena barvou červenou.



obr. 6.5.5 - Umístění sondy při měření ve vzduchové mezeře elektromagnetu

tab. 6.5.5 – Výsledky praktického měření na MEP 058

Vzdálenost od okraje cívky [mm]	I [A]	B [mT]	H [kA/m]	Graf
20 mm	5,443	32,7	26,02	graf 6.5.6
40 mm	5,377	148,3	118	graf 6.5.7
60 mm	5,178	58,67	46,69	graf 6.5.8

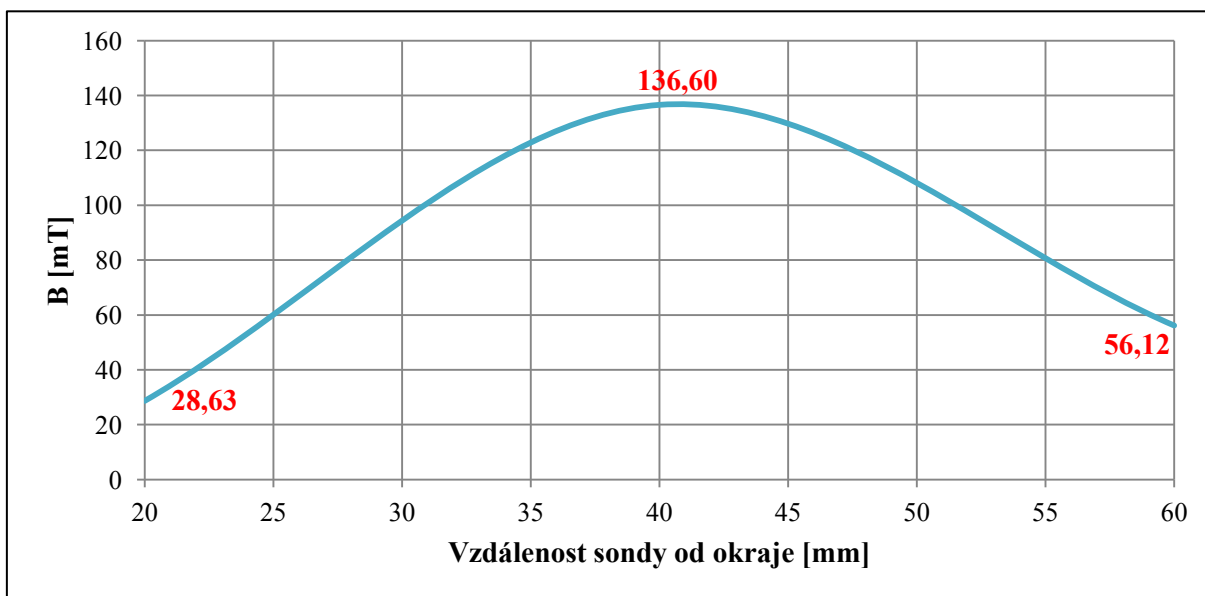
Tabulka zobrazuje pouze maximální naměřené hodnoty při jednotlivých vzdálenostech zasunutí měřicí sondy do vzduchové mezery elektromagnetu. Z hodnot uložených do textového souboru jsou vytvořeny grafy závislosti magnetické indukce na proudu protékajícím cívkou.

Ve všech **grafech 6.5.6 – 6.5.8** je opět vidět lineární závislost magnetické indukce na proudu protékajícím cívkou. Na začátku cívky dochází k větším skokům magnetické indukce, nežli na konci a to z důvodu možného přiblížení se k železu. Jelikož tvar vzduchové mezery zde není kruhového průřezu, ale kuželového tvaru. Jako v předchozím případě uprostřed vzduchové mezery cívky elektromagnetu (**graf 6.5.7**) je magnetizační i demagnetizační charakteristika čistě lineární a průběhy jsou téměř totožné. Magnetické pole je v těchto místech homogenní a bez výrazných změn.

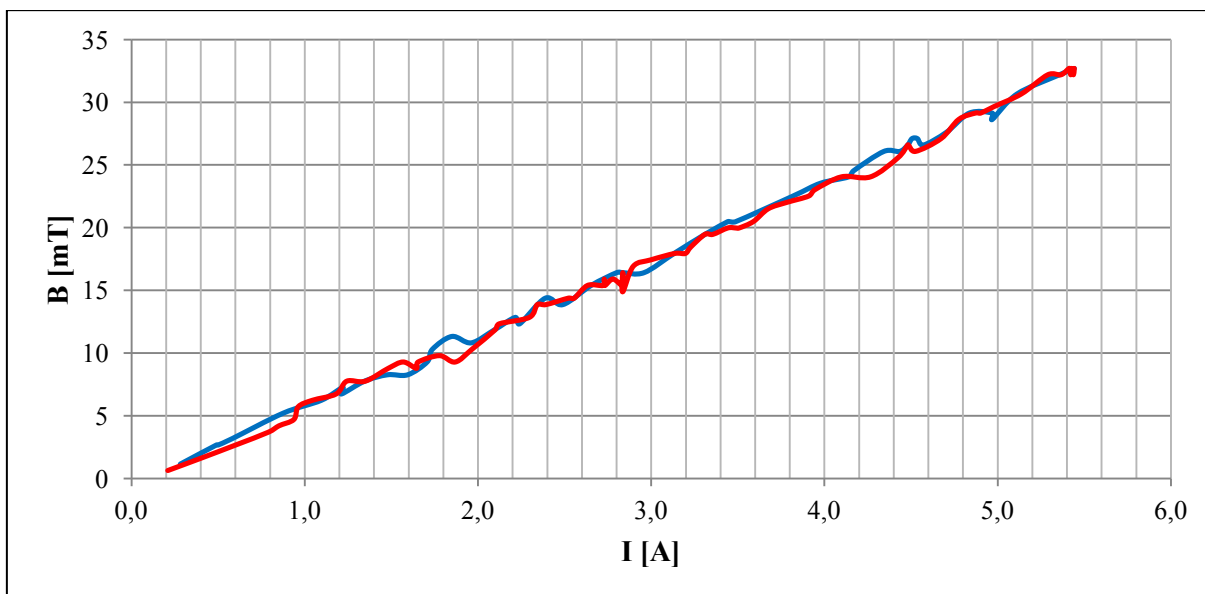
Na křivce rozložení magnetické indukce po délce vzduchové mezery (graf 6.5.5) je zřetelné rozložení magnetického pole, kdy uprostřed cívky se dosahuje největší magnetické indukce, a pole, stejně jako v předchozím případě, směrem k okrajům slábne. Aby bylo dosaženo u obou měření přesnějšího rozložení magnetického pole po délce cívky, musela by se měřicí sonda posouvat po menších krocích.

tab. 6.5.6 – Tabulka hodnot pro rozložení magnetické indukce na délce cívky

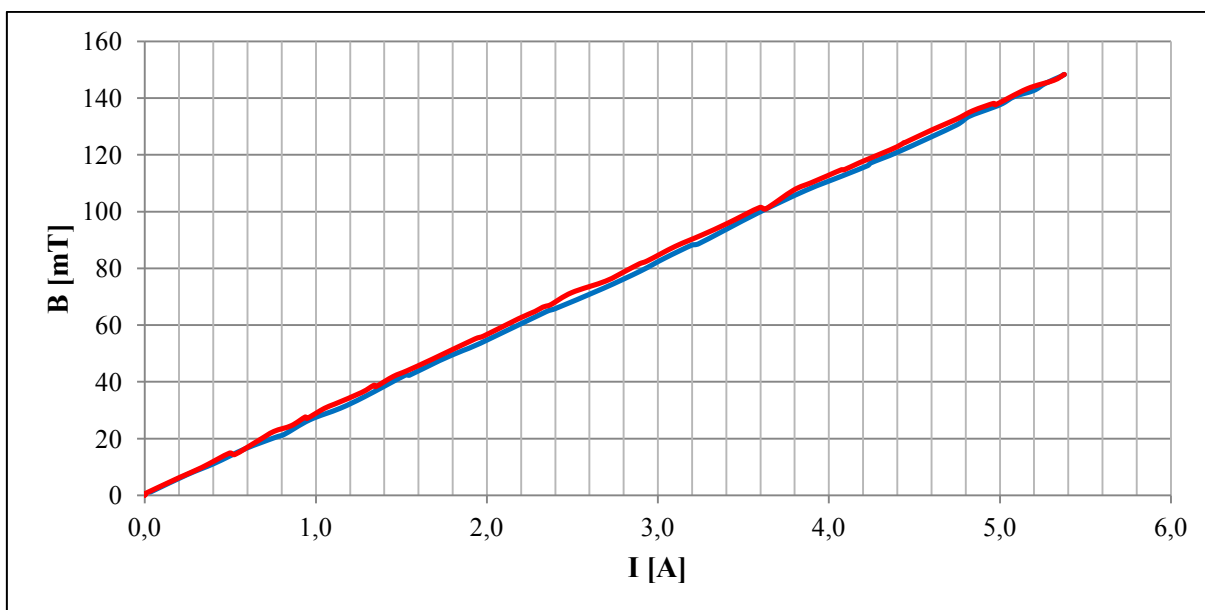
	Začátek cívky	Střed cívky	Konec cívky
B [mT]	28,63	136,6	56,12
I [A]	4,969	4,954	4,959



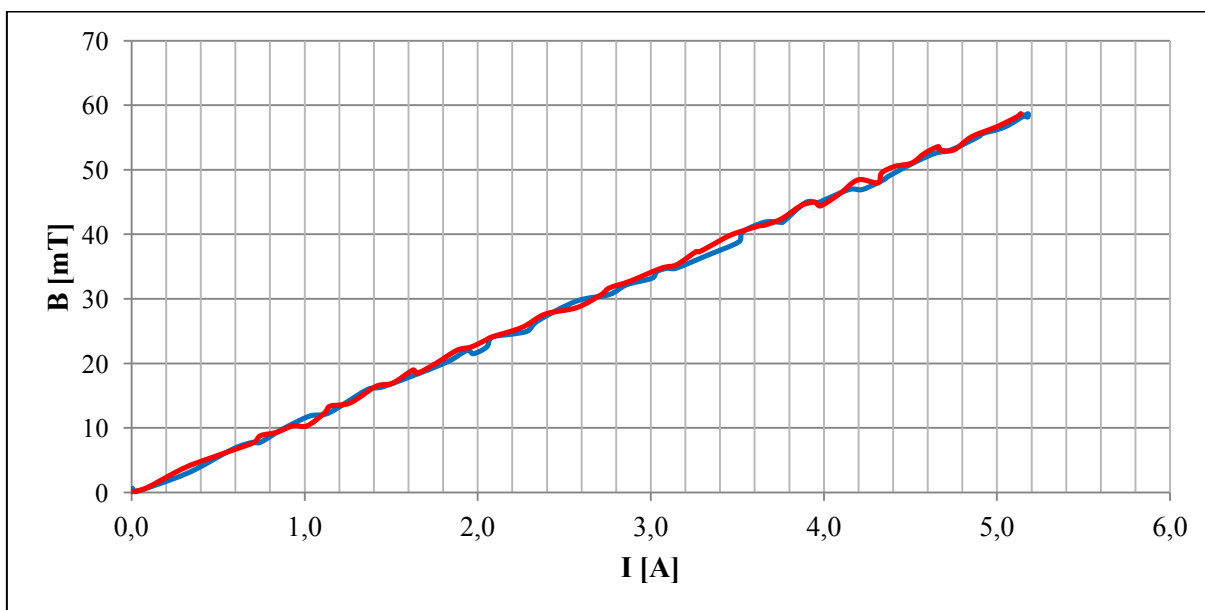
graf 6.5.5 - Graf rozložení magnetické indukce na délce cívky



graf 6.5.6 - Graf $B = f(I)$ (MEP 058 - začátek cívky)



graf 6.5.7 - Graf $B = f(I)$ (MEP 058 - uprostřed cívky)



graf 6.5.8 - Graf $B = f(I)$ (MEP 058 - konec cívky)

7. Závěr

Diplomová práce se ve svém rozsahu zabývá základním vysvětlením elektromagnetického pole, jejich veličin, možností měření a následně v praktické části i přípravou a realizací virtuálního měřicího pracoviště pro využití v reálném měření elektromagnetických soustav.

Elektromagnetické pole je velice široký soubor fyzikálních a elektrických znalostí, které jsou velice úzce propojeny. Jedná se v podstatě o propojení dvou fyzikálních polí, elektrického pole a pole magnetického, které na své okolí působí magnetickými silami. Tyto síly se v elektrotechnice velice hojně využívají k mnoha aplikacím. Od aplikací pro měřicí přístroje, jističe, telefon, až po velké elektromagnetické jeřáby s nosností mnoha tun železa.

Diplomová práce byla směřována ke znalostem aplikace elektromagnetického pole v elektronových mikroskopech a jejich základní fungování. Tyto přístroje obrovským podílem přispěly při zkoumání struktury látek. Transmisní elektronový mikroskop, fungující na principu průchodu elektronu materiálovou strukturou, nám poskytuje velice dobrý obraz struktury zkoumaného materiálu s možností rozpoznání jednotlivých atomů. Zjednodušeně lze říci, že zdroj u optického mikroskopu, jímž jsou fotony světla, byl nahrazen zdrojem elektronů vycházejících z elektronového děla. Tento paprsek elektronů je dále zesilován, směřován a zaostřován pomocí elektromagnetických čoček, které působením elektromagnetického pole na procházející elektrony upravují jejich dráhu. Po dopadu na zkoumanou látku dojde u části elektronů k průchodu skrz látku, čímž se změní i jejich rychlost a vše je posléze zaznamenáno. Určitá část elektronů se od dané látky odrazí do okolí v různých formách záření. Této skutečnosti využívá rastrovací elektronový mikroskop, který zaznamenává odražená záření od materiálu. Primárně je určen právě k pozorování a zkoumání povrchů materiálu.

Diplomovou práci na toto téma jsem si vybral za účelem aplikace znalostí z programování ve vývojovém prostředí LabVIEW™, pomocí něhož jsem vytvořil virtuální měřicí pracoviště, které je stěžejním bodem praktické části. Největší devízou při programování v LabVIEW™ je možnost vytvořit si vlastní přístroje na čelním panelu, nové funkce anebo rychlá úprava funkcí programu.

Virtuální měřicí pracoviště přispívá k lepšímu a snadnějšímu měření magnetických polí s využitím měřicí karty od firmy National Instruments NI – USB 6008 a Teslametru F. W. Bell 5180. Měřicí karta, schopná zpracovávat pouze napětí, je nejmenší a nejlevnější profesionální měřicí kartou. Po nastavení komunikace s vytvořeným programem dokáže snímat hodnoty a posílat je do programu k vyhodnocení a následnému zápisu do textového souboru. Program uživateli vykresluje grafy průběhů, vypočítává maximální, minimální a efektivní hodnoty. Dále umožňuje při měření střídavých magnetických polí využití Fast Fourierovy transformace s vykreslením do přehledného grafu.

Zaznamenaná data v textových souborech jsou uzpůsobena pro pozdější exportování do tabulkového editoru, kde může probíhat jejich další analýza na základě uživatelských požadavků, nebo mohou být zpětně nahrána do programu k analýze.

U programu bylo dbáno na jeho obecné pojetí. Proto může být program dále využíván při různých měřeních elektromagnetických polí. Určitým vylepšením programu by mohlo být zakomponování ovládání krokového motorku, který by svým pohybem zasunoval plynule sondu dovnitř elektromagnetu. Jelikož karta NI – USB 6008 má i analogový výstup, postačil by pouze vhodný přípravek a krokový motorek.

Součástí praktického využití virtuálního měřicího pracoviště bylo ověření funkčnosti programu při reálném měření. Měření probíhalo na dvou kusech elektromagnetů od firmy MEP Postřelmov, a.s. Při samotném měření byla axiální měřicí sonda zasunuta do vzduchové mezery, která vznikla po vyjmutí kotvy elektromagnetu, na tři místa měření. Na začátku, uprostřed a na konci cívky, byly měřeny a zaznamenávány hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole při zvyšujícím se proudu protékajícím cívkou. Regulace proudu cívkou probíhala změnou napětí stejnosměrného zdroje od 0 V do 30 V, čímž byla změřena magnetizační křivka. Plynulým poklesem napětí zpět na 0V docházelo k poklesu proudu v cívce a postupné demagnetizaci.

U obou měření byla z grafů patrná lineární závislost velikosti magnetické indukce na protékajícím proudu cívkou. Místy se u grafů z měření na začátku a na konci cívky objevovaly skoky, které byly způsobeny působením rozptylových toků a možným přiblížením měřicí sondy k železu, jelikož vzduchová mezera nebyla po celé délce kruhového průřezu, ale na začátku cívky se změnila do kuželovitého tvaru.

Hlavním přínosem diplomové práce do budoucna je virtuální měřicí pracoviště, zjednodušující budoucím studentům měření magnetických polí a jejich záznam do textových souborů bez nutné znalosti programování. Uživatelsky přívětivé prostředí programu umožňuje bezproblémové nastavení programu a následnou analýzu naměřených dat.

Seznam použité literatury

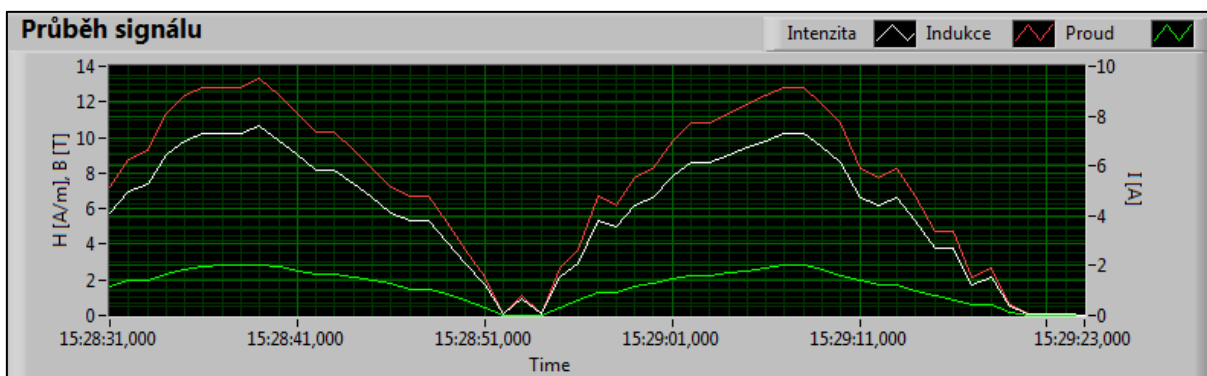
- [1] NOVOTNÝ, Karel. *Teorie elektromagnetického pole I*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 187 s. ISBN 80-010-3226-4.
- [2] KMOCH, Ondřej. *Měření magnetické indukce permanentních magnetů*. Náchod, 2002.
- [3] KULHÁNEK, Petr. *Elektrina a magnetismus: Indukčnost a magnetická energie*. 2007. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz.html>
- [4] KAREL DRAXLER, Petr Kašpar. *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 80-010-3970-6.
- [5] DĚDEK, Libor. *Teorie elektromagnetického pole*. 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 218 s. ISBN 80-214-0219-9.
- [6] SZÁNTÓ, Ladislav. *Maxwellovy rovnice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 111 s. ISBN 80-730-0096-2.
- [7] ĎAĎO, Stanislav. *Senzory a měřicí obvody*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 315 s. ISBN 80-010-2057-6.
- [8] NAVRÁTIL, J., BÁREK, A., FOJTŮ, P., SOLNÝ, P. *Elektronová mikroskopie v materiálovém výzkumu*. FJFI ČVUT 2005
- [9] KARLÍK, Miroslav. *Transmisní elektronová mikroskopie: pohled do nitra materiálu*. Dostupné z: http://rumcajs.fjfi.cvut.cz/fyzport/FT/2004/Difrakce/05_Karlik_CsCAsFyz_manu.pdf
- [10] VAJNRIB, E. A., MILJUTIN, V. I. *Elektronová optika*. Praha: Československá akademie věd, 1956.
- [11] MAREK, Martin a Regina HOLČÁKOVÁ. Computer simulation of electromagnetic field distribution in type lens of the electron microscope. In: *Electric Power Engineering 2011: proceedings of the 12th international scientific conference : May 17-19, 2011, hotel Dlouhé Stráně, Kouty nad Desnou, Czech Republic, Ostrava*: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 423-430. ISBN 978-80-248-2393-5.
- [12] HOLČÁKOVÁ, Regina a Martin MAREK. Innovative Research in Electron Microscopes, Analysis of Magnetic Field Distribution of Some Types of Magnetic Lenses by FEM. In: CACIOTTA, M. , ed., Z. LEONOWICZ, ed. *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering : Rome, 8-11 May 2011* [CD-ROM]. Wrocław: Politechnika Wroclawska, c2011, s. 184-187. ISBN 978-1-4244-8781-3 (plné texty).
- [13] ECKERTOVÁ, Ludmila, ed., FRANK, Luděk, ed. a DELONG, Armin, ed. *Metody analýzy povrchů: elektronová mikroskopie a difrakce*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1996. 379 s. ISBN 80-200-0329-0.
- [14] VARMUŽA, Petr. *Absolvování individuální odborné praxe*. Ostrava, 2010. Bakalářská práce. VŠB - TU Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jiří Pospíšilík, Ph.D.

- [15] VLACH, Jaroslav. *Multifunkční karta a její aplikace. Automatizace* [online]. 2008, roč. 51, č. 12. Dostupné z: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=2392>
- [16] Laboratoř magnetických měření: *Gauss-Teslametr F.W.Bell 5180* [online]. 2008, Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/pracoviste/pracoviste_soubory/h204/02_vybaveni/merici%20systemy/A02-teslametr%20FWB.htm
- [17] NEBEŠÁŘOVÁ, Jana. *Elektronová mikroskopie pro biology* [online]. 2001. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/index.html>
- [18] National Instruments: NI - USB 6008. NATIONAL INSTRUMENTS. *Products & Services* [online]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/201986>
- [19] F.W BELL, *F.W. Bell 5180 Datasheet* [pdf]. Dostupné z: <http://fwbell.com/Category/1.aspx>
- [20] F.W BELL, *Probes Datasheet* [pdf]. Dostupné z: <http://fwbell.com/Category/1.aspx>
- [21] MAREK, Martin. *Způsoby zjišťování magnetických vlastností konstrukčních materiálů, specifické příklady užití a aplikací magnetických měření*. Ostrava, 2005. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrických strojů a přístrojů.
- [22] MAREK, Martin et al. Innovative Research in Electron Microscopes, Magnetic Properties of Steels and Alloys for Magnetic Lenses and Chambers. In: CACIOTTA, M., ed., Z. LEONOWICZ, ed. *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering : Rome, 8-11 May 2011* [CD-ROM]. Wrocław: Politechnika Wroclawska, c2011, s. 188-191. ISBN 978-1-4244-8781-3 (plné texty).

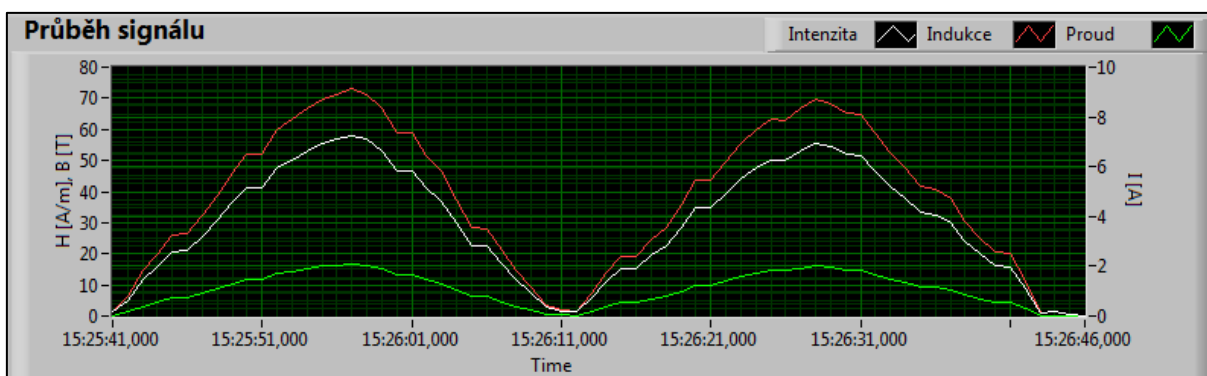
Přílohy diplomové práce

Příloha č. 1 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP DA271 – začátek cívky).....	52
Příloha č. 2 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP DA271 – prostředek cívky).....	52
Příloha č. 3 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP DA271 – konec cívky)	52
Příloha č. 4 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP 058 – začátek cívky)	53
Příloha č. 5 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP 058 – začátek cívky)	53
Příloha č. 6 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP 058 – začátek cívky)	53
Příloha č. 7 - Zapojené měřicí pracoviště.....	54
Příloha č. 8 – Detail zapojené měřicí sondy	54
Příloha č. 9 – Detail axiální měřicí sondy [20]	55

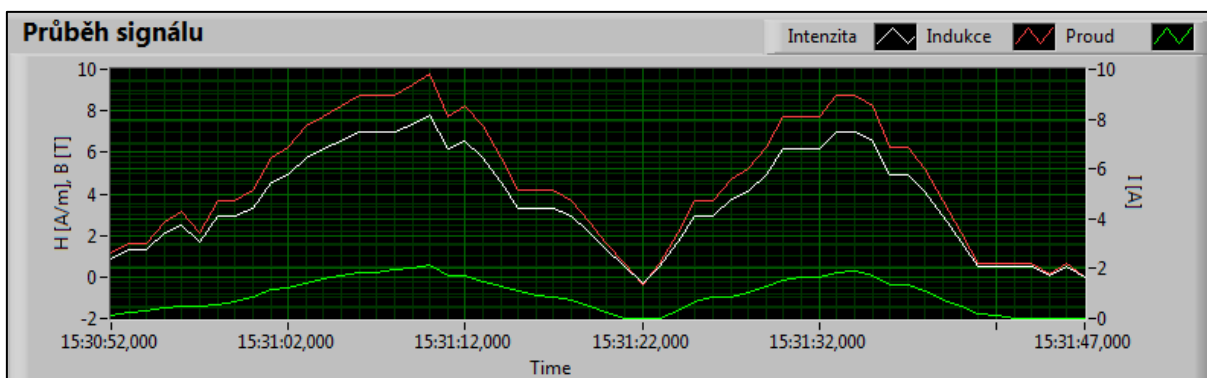
Příloha č. 1 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP DA271 – začátek cívky)



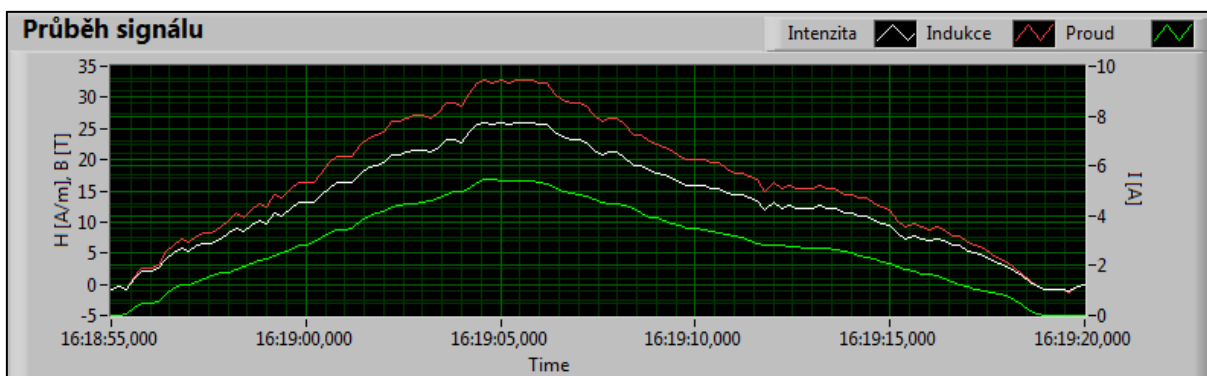
Příloha č. 2 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP DA271 – prostředek cívky)



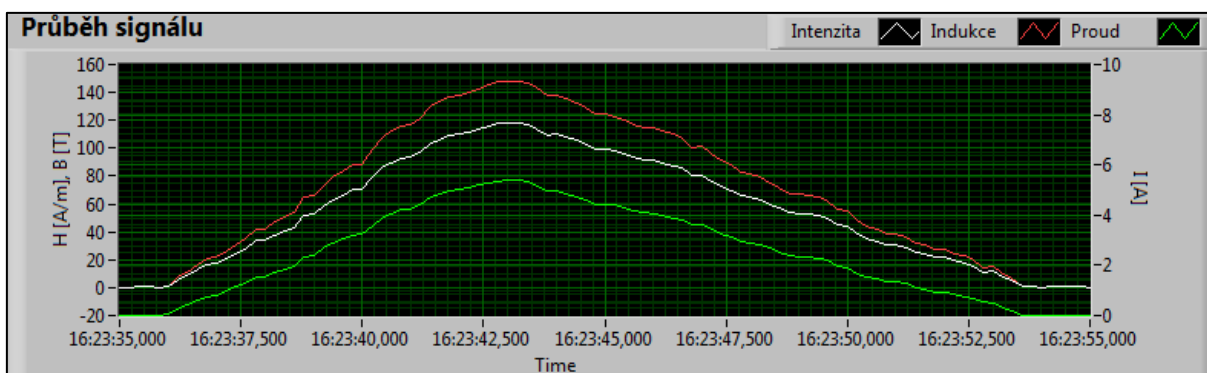
Příloha č. 3 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP DA271 – konec cívky)



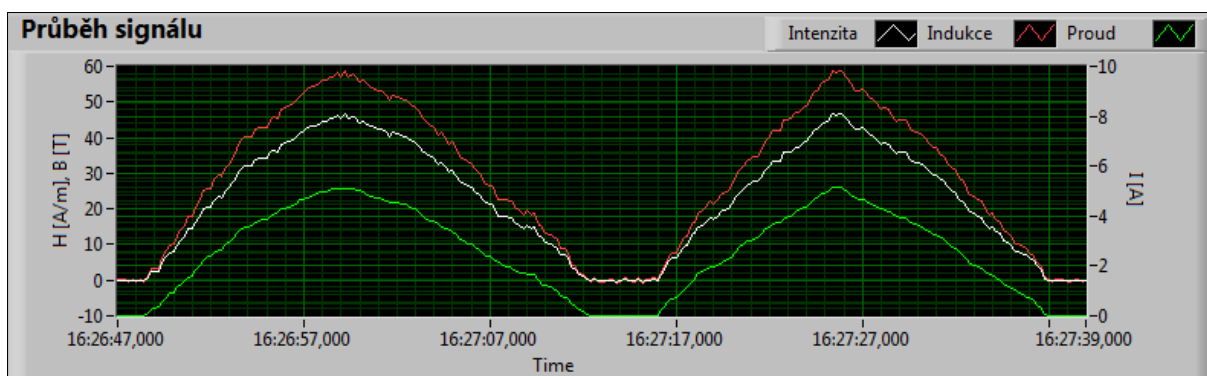
Příloha č. 4 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP 058 – začátek cívky)



Příloha č. 5 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP 058 – začátek cívky)



Příloha č. 6 – Časový záznam měřených signálů v programu (MEP 058 – začátek cívky)



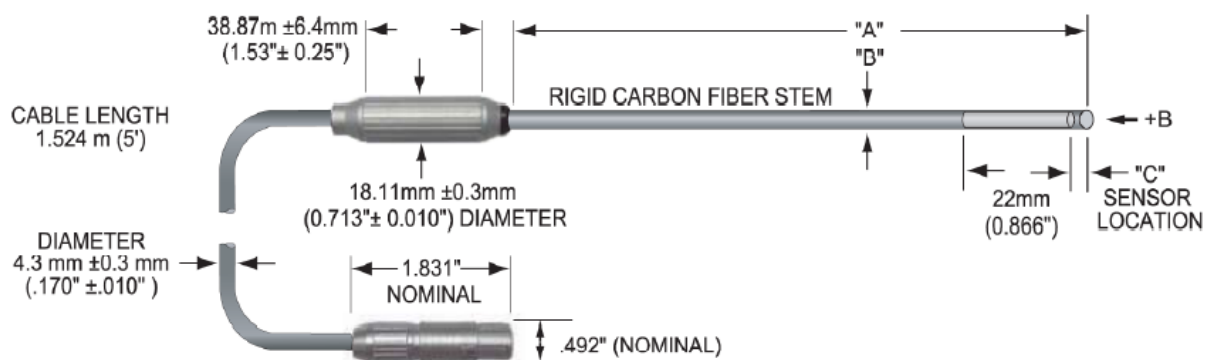
Příloha č. 7 - Zapojené měřicí pracoviště



Příloha č. 8 – Detail zapojené měřicí sonda



Příloha č. 9 – Detail axiální měřicí sondy [20]



Seznam použitých obrázků

obr. 2.4.1 - Magnetický tok.....	5
obr. 2.4.2 - Magnetické napětí.....	5
obr. 2.5.1 – Zdroje magnetického toku.....	6
obr. 2.5.2 – Magnetický obvod	7
obr. 2.5.3 – Kirchhoffovy zákony pro mag. obvody.....	7
obr. 2.5.4 - Klínová vzduchová mezera	8
obr. 2.5.5 - Válcový elektromagnet solenoid	9
obr. 3.1.1 - Elektronový mikroskop a základní součásti.....	14
obr. 3.1.2 - Elektromagnetická čočka.....	15
obr. 3.1.3 - Elektronová děla.....	15
obr. 3.1.4 - Možnosti odrazů elektronů	16
obr. 3.2.1 - Používané elektronové mikroskopy.....	17
obr. 3.2.2 - Odrazy elektronů u SEM.....	18
obr. 4.1.1 - Vzduchová cívka	19
obr. 4.1.2 - Náhradní schéma indukční cívky.....	20
obr. 4.1.3 - Magnetometr s rotační cívkou	20
obr. 4.1.4 - Feromagnetická sonda a její uspořádání	21
obr. 4.2.1 - Hallova sonda.....	22
obr. 4.2.2 - Magnetodioda	23
obr. 4.2.3 - Magnetotranzistor	23
obr. 4.2.4 - Magnetorezistor	24
obr. 5.2.1 - Krátká magnetická čočka	26
obr. 5.2.2 - Pancéřová magnetická čočka	26
obr. 5.2.3 - Magnetická čočka s pólovými nastavci.....	27
obr. 5.3.3 - Astigmatismus.....	28
obr. 5.3.1 - Důsledky sférické vady	28
obr. 5.3.2 - Vznik sférické vady	28
obr. 6.1.1 - Ukázka čelního panelu a blokového diagramu.....	30
obr. 6.2.1 - Karta NI – USB 6008.....	31
obr. 6.3.1 - Teslametr FW Bell 5180	31

obr. 6.4.1 - Čelní panel programu.....	32
obr. 6.4.2 - Blokový diagram programu.....	33
obr. 6.4.3 - Režim simulace	34
obr. 6.4.4 - Ikona režimu načtení dat	34
obr. 6.4.5 - Funkce měření v blokovém diagramu.....	35
obr. 6.4.6 - Karta měření na čelním panelu	35
obr. 6.4.7 - Ikona subVI přepočtu hodnot.....	36
obr. 6.4.8 - Podmínka FALSE	36
obr. 6.4.9 - Podmínka TRUE	36
obr. 6.4.10 - Ikona subVI zápisu do tabulky.....	36
obr. 6.4.11 - Výřez subVI v blokovém diagramu	37
obr. 6.4.12 - Blokový diagram časovače zápisu	37
obr. 6.4.13 - Systémový dialog po uplynutí času.....	37
obr. 6.4.14 - Čelní panel zápisu do souboru	38
obr. 6.4.15 - SubVI zápisu do souboru	38
obr. 6.4.16 - Ukázka uloženého souboru	38
obr. 6.5.1- Elektromagnet MEP DA271	39
obr. 6.5.2 – Elektromagnet MEP 058.....	39
obr. 6.5.3 - Schéma zapojení měření	40
obr. 6.5.4 - Umístění sondy při měření ve vzduchové mezeře elektromagnetu.....	41
obr. 6.5.5 - Umístění sondy při měření ve vzduchové mezeře elektromagnetu.....	44

Seznam tabulek

tab. 2.4.1- Příklady velikostí indukci z praxe	4
tab. 4.1.1 - Základní parametry některých vyráběných fluxgate Teslametrů [4].....	22
tab. 4.2.1 - Výrobci Hallových sond a jejich parametry[4]	22
tab. 4.2.2 - Magnetorezistory od firmy Siemens[4]	24
tab. 6.2.1- Specifikace NI – USB 6008	31
tab. 6.3.1 - Specifikace Teslametru F.W. Bell 5180[16].....	31
tab. 6.3.2 - Typ a specifikace použité Hallovy sondy [20].....	31
tab. 6.5.1 - Základní vlastnosti elektromagnetu MEP DA271	39
tab. 6.5.2 - Základní vlastnosti elektromagnetu MEP 058	39
tab. 6.5.3 – Výsledky praktického měření na MEP DA271	42

tab. 6.5.4 – Tabulka hodnot pro rozložení magnetické indukce na délce cívky	42
tab. 6.5.5 – Výsledky praktického měření na MEP 058	44
tab. 6.5.6 – Tabulka hodnot pro rozložení magnetické indukce na délce cívky	45

Seznam grafů

graf 6.5.1 - Graf rozložení magnetické indukce na délce cívky	42
graf 6.5.2 - Graf $B = f(I)$ (MEP DA271 - začátek cívky)	43
graf 6.5.3 - Graf $B = f(I)$ (MEP DA271 - uprostřed cívky)	43
graf 6.5.4 - Graf $B = f(I)$ (MEP DA271 - konec cívky)	43
graf 6.5.5 - Graf rozložení magnetické indukce na délce cívky	45
graf 6.5.6 - Graf $B = f(I)$ (MEP 058 - začátek cívky)	45
graf 6.5.7 - Graf $B = f(I)$ (MEP 058 - uprostřed cívky)	46
graf 6.5.8 - Graf $B = f(I)$ (MEP 058 - konec cívky)	46